



LA DESORIENTATION SPATIALE EN AERONAUTIQUE: Apport des Neurosciences intégratives à la conception des postes de pilotage

Franck Mars

► To cite this version:

Franck Mars. LA DESORIENTATION SPATIALE EN AERONAUTIQUE: Apport des Neurosciences intégratives à la conception des postes de pilotage. Psychologie. Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2001. Français. NNT: . tel-00364838

HAL Id: tel-00364838

<https://theses.hal.science/tel-00364838>

Submitted on 27 Feb 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de la Méditerranée
Aix Marseille II

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Neurosciences

Présentée par **Franck Mars**

Pour l'obtention du titre de docteur de l'Université de la Méditerranée

LA DESORIENTATION SPATIALE

EN AERONAUTIQUE :

Apport des Neurosciences intégratives

à la conception des postes de pilotage

Soutenue le 14 décembre 2001 devant le jury composé de

F. Lestienne	Professeur, Caen	<i>Rapporteur</i>
J. McIntyre	Chargé de Recherche au CNRS, Paris	<i>Examineur</i>
A. Nieoullon	Professeur, Aix-Marseille II	<i>Président</i>
T. Ohlmann	Professeur, Grenoble II	<i>Rapporteur</i>
J. Pailhous	Directeur de Recherche au CNRS, Marseille	<i>Examineur</i>
J.-L. Vercher	Directeur de Recherche au CNRS, Marseille	<i>Directeur de thèse</i>

Une personne rationnelle ne s'attend pas à ce que le monde se conforme à ses idées.

Elle comprend qu'elle doit se conformer au monde rationnel.

En conséquence, toutes les percées importantes sont accomplies par des personnes irrationnelles.

David Mack, traduit de l'anglais

PREAMBULE 6

CADRE GENERAL..... 9

1. LA DESORIENTATION SPATIALE EN AERONAUTIQUE..... 9

1.1. DESORIENTATION D'ORIGINE VISUELLE 10

1.2. DESORIENTATION D'ORIGINE VESTIBULAIRE 15

1.2.1. Les illusions somatogyrales 15

1.2.2. Les illusions somatograviques 20

1.2.3. Les illusions visuo-vestibulaires 23

1.3. AUTRES PHENOMENES LIES A LA DESORIENTATION SPATIALE..... 25

1.3.1. Le phénomène du break-off 25

1.3.2. Le phénomène de la main géante 25

2. LES MECANISMES DE L'ORIENTATION SPATIALE 26

2.1. LES SYSTEMES SENSORIELS..... 26

2.1.1. La vision 26

2.1.2. Le système vestibulaire..... 31

2.1.3. La somesthésie 39

2.2. LES FACTEURS DE L'INTEGRATION SENSORIELLE 40

2.2.1. Plurimodalité de la perception : redondance, complémentarité et gestion des conflits..... 40

2.2.2. Espaces et référentiels spatiaux..... 43

2.2.3. Le cortex pariétal 48

2.3. LA VERTICALE SUBJECTIVE : INDICATEUR PRIVILEGIE DE L'ORIENTATION PERÇUE DE LA GRAVITE 50

2.3.1. Manipulation des indices visuels 52

2.3.2. Manipulation de l'orientation corporelle 55

2.3.3. Verticale subjective et perception de l'orientation du corps..... 56

2.3.4. Variabilité associée à la verticale subjective : influence des styles perceptifs 58

3. L'ERGONOMIE SENSORIELLE AU SERVICE DE LA LUTTE CONTRE LA DESORIENTATION SPATIALE 61

3.1. PROBLEME DU PILOTAGE A DOMINANCE VISUELLE 61

3.2. REMISE EN QUESTION DE L'INDICATEUR D'ATTITUDE «INSIDE LOOKING OUT» 65

3.3. L'HORIZON DE MALCOLM (PERIPHERAL VISION DISPLAY) 66

3.4. PROSPECTIVE : ET LES AUTRES SENS? 68

3.4.1. Les stimulateurs tactiles 68

3.4.2. La stimulation vestibulaire..... 69

PARTIE EXPERIMENTALE I : EFFETS D'UN CADRE VISUEL SOLIDAIRE DE LA TETE SUR LA VERTICALE SUBJECTIVE – IMPLICATIONS POTENTIELLES POUR LA CONCEPTION DES AFFICHEURS DE CASQUE EN AERONAUTIQUE .. 71

1. INTRODUCTION	71
2. EXPERIENCE 1 : EFFETS D'UN CADRE VISUEL CEPHALOCENTRE SUR LA VERTICALE SUBJECTIVE LORS D'INCLINAISONS DE LA TETE	75
2.1. METHODES	77
2.1.1. Sujets.....	77
2.1.2. Matériel.....	77
2.1.3. Procédure	79
2.1.4. Analyse des données	82
2.2. RESULTATS.....	84
2.2.1. Analyses individuelles	84
2.2.2. Analyses globales	84
2.3. DISCUSSION	89
2.3.1. Réfutation de l'hypothèse d'additivité des effets visuels et posturaux.....	89
2.3.2. La désorientation spatiale : un phénomène à deux visages.....	90
2.3.3. Traitement de l'information visuelle en mouvement dans le référentiel céphalocentré	91
3. EXPERIENCE 2 : EFFETS D'UN CADRE VISUEL CEPHALOCENTRE SUR LA REORIENTATION DE LA TETE ET LA VERTICALE SUBJECTIVE LORS D'INCLINAISONS CORPORELLES.....	93
3.1. METHODES	95
3.1.1. Sujets.....	95
3.1.2. Matériel.....	96
3.1.3. Procédure	97
3.2. RESULTATS.....	100
3.3. DISCUSSION	105
3.3.1. Ancrage des références visuelles et réorientation de la tête	105
3.3.2. Ancrage des références visuelles et verticale subjective.....	107
4. CONCLUSIONS DE LA PARTIE EXPERIMENTALE I	109

PARTIE EXPERIMENTALE II : EFFETS DE LA STIMULATION GALVANIQUE VESTIBULAIRE SUR LA PERCEPTION DE L'ORIENTATION SPATIALE..... 111

1. INTRODUCTION	111
1.1. LA STIMULATION GALVANIQUE VESTIBULAIRE	112
1.2. STIMULATION GALVANIQUE VESTIBULAIRE ET FONCTIONS MOTRICES	114
1.3. STIMULATION GALVANIQUE VESTIBULAIRE ET ILLUSIONS D'ORIENTATION.....	116
2. EXPERIENCE 3 : EFFET SUPRAMODAL DE LA STIMULATION GALVANIQUE VESTIBULAIRE SUR LA VERTICALE SUBJECTIVE	118
2.1. METHODES	119
2.2. RESULTATS.....	123
2.3. DISCUSSION	125
3. EXPERIENCE 4 : DISSOCIATION ENTRE INCLINAISON DE LA VERTICALE SUBJECTIVE ET ILLUSIONS D'ORIENTATION DU CORPS INDUITES PAR LA STIMULATION GALVANIQUE VESTIBULAIRE	128
3.1. METHODES	130
3.2. RESULTATS.....	131
3.2.1. Analyses globales	131
3.2.2. Analyses individuelles	134
3.3. DISCUSSION	137
3.3.1. Illusions d'inclinaison corporelle induites par la stimulation galvanique vestibulaire	138
3.3.2. Dissociation entre verticale subjective et perception de l'orientation du corps.....	139
3.3.3. Interprétation de la réponse posturale de la tête.....	140
4. CONCLUSIONS DE LA PARTIE EXPERIMENTALE II.....	142

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES 145

REFERENCES..... 149

PREAMBULE

On sait depuis les débuts de l'aviation qu'un pilote privé de références visuelles n'arrive pas à maintenir son avion en ligne de vol correcte sans instrument pour le guider. Cette observation n'a rien d'étonnant, car si l'homme a su développer en un court laps de temps des machines lui permettant de voler, son corps et ses sens, quant à eux, sont le produit d'une longue évolution et ne sont destinés qu'à lui permettre de se mouvoir à la surface de la terre. Bien entendu, l'homme a conçu ses machines volantes de façon la plus adaptée possible à son organisme, mais, dans certaines circonstances, cette adaptation ne suffit pas et donne lieu à des accidents. La désorientation spatiale est une des causes de ces accidents. Elle peut prendre de nombreuses formes, avoir des causes très variées et aboutir à des conséquences plus ou moins dramatiques. Plusieurs définitions ont été proposées au fil du temps pour donner une unité à ces phénomènes et, à l'heure actuelle, celle de Benson (1973) est sans doute la plus consensuelle. Il définit comme cas de désorientation spatiale tout «incident où le pilote a une perception erronée de la position, du mouvement ou de l'attitude de son avion ou de lui-même par rapport au système fixe de coordonnées fourni par la surface de la terre et la verticale gravitaire».

Pour pallier aux percepts erronés engendrés chez les pilotes par les contraintes inhérentes au vol, les concepteurs en aéronautique ont décidé de fournir des informations d'orientation par le biais de l'instrumentation de bord, dont l'archétype est l'horizon artificiel. Certaines des formes de désorientation spatiale connues depuis longtemps peuvent donc être évitées grâce à l'instrumentation de bord. Cependant, des problèmes subsistent et l'évolution des aéronefs, de plus en plus agiles, risque d'amener le pilote de plus en plus rapidement aux limites de ses sens. Par conséquent, des efforts considérables sont accomplis par les concepteurs en aéronautique afin de prendre en compte les facteurs humains lors de la conception de l'aéronef et, en particulier, celle du cockpit et des interfaces homme-machine. En ce qui concerne la lutte contre la désorientation spatiale, une attention croissante est portée à l'ergonomie sensorielle et cognitive, avec pour objectif de présenter l'information au pilote sous la forme la plus compatible possible avec les processus naturels de l'orientation spatiale. Connaître et

comprendre les caractéristiques et les propriétés de nos sens est donc extrêmement important pour déterminer ce qui, dans l'environnement du pilote, peut être source potentielle d'aggravation du risque de désorientation.

Les considérations précédentes peuvent être envisagées comme les fondements du travail de thèse dont le présent manuscrit rend compte. L'origine de ce travail réside dans les contacts entrepris entre l'Unité Mixte de Recherche CNRS «Mouvement & Perception» et la société Dassault Aviation. Ces contacts ont abouti en 1998 à l'élaboration d'un programme de recherche portant sur le risque de désorientation spatiale chez le pilote de chasse, et plus spécifiquement sur les aspects liés à l'interface homme-machine du cockpit. Les travaux devaient s'effectuer dans le cadre d'une thèse de Neurosciences et d'une convention CIFRE-ANRT. Il s'agissait de comprendre comment et pourquoi un pilote, dans certaines phases de vol, peut se retrouver désorienté, alors même qu'il dispose théoriquement sur son tableau de bord des informations nécessaires à la connaissance de la position et de l'attitude de son avion dans l'espace. Les raisons étaient à chercher soit dans un mauvais choix quant à la nature et/ou la forme des informations fournies au pilote (donc lié à la conception de l'interface), soit dans des raisons psychologiques et/ou physiologiques liées au pilote lui-même. Le projet avait pour ambition d'acquérir une base de connaissance la plus exhaustive possible sur les causes, les effets et les circonstances d'occurrence de la désorientation spatiale et de tester des solutions prophylactiques (éviter la désorientation) et curatives (en traiter les effets). Ce travail de thèse se situe par conséquent à la charnière entre, d'une part, les neurosciences intégratives qui visent à élucider les déterminants nerveux des aspects perceptifs de l'orientation spatiale, et, d'autre part, l'ergonomie cognitive qui vise à améliorer l'adaptation de l'instrumentation embarquée à bord des aéronefs au traitement de l'information spatiale effectué par le pilote.

L'organisation de ce manuscrit respecte la démarche scientifique qui a été la mienne au cours de ces trois années, démarche qui a suivi la logique fondatrice du projet de recherche. Le cadre général s'articule autour de trois axes dont l'examen était nécessaire afin de répondre aux objectifs de la thèse. Le premier axe présente l'état actuel des connaissances relatives aux différentes formes de désorientation spatiale en aéronautique, en faisant référence aux mécanismes nerveux sous-jacents. Le deuxième axe décrit les caractéristiques des systèmes sensoriels impliqués dans l'orientation spatiale (de façon succincte mais orientée vers les conséquences potentielles que ces

caractéristiques peuvent avoir en vol) et l'intégration faite par le système nerveux central de ces différentes sources d'informations. Le troisième axe enfin aborde les problèmes posés à l'ergonomie sensorielle appliquée à la conception des postes de pilotage et présente quelques exemples de ce qu'une bonne prise en compte des caractéristiques de nos sens peut lui apporter.

Le cadre théorique, nécessairement non-exhaustif, fait donc un état des lieux des questions qui sous-tendent cette thèse. Les travaux expérimentaux qui suivent sont divisés en deux parties. La première partie concerne l'étude des effets de références visuelles fixes par rapport à la tête sur la perception de la verticale, avec pour objectif d'évaluer les risques potentiels liés à l'utilisation de l'afficheur de casque (head-mounted display), un outils de plus en plus utilisé dans les aéronefs. La seconde partie expérimentale aborde les conséquences perceptives de la stimulation galvanique vestibulaire dont, nous le verrons, l'utilisation comme moyen préventif de la désorientation spatiale est envisageable.

CADRE GENERAL

1. La désorientation spatiale en aéronautique

Normalement, aucun pilote professionnel ne mettra jamais intentionnellement son avion dans une attitude inhabituelle et dangereuse et, la plupart du temps, le pilote dispose des informations nécessaires pour éviter ce cas de figure. Il peut prélever ces informations dans l'environnement extérieur, comme par exemple s'orienter par rapport à la ligne d'horizon. Lorsque la visibilité est réduite ou lors de vol de nuit, la tâche devient plus ardue et le pilote doit alors recourir obligatoirement à ses instruments de bord. Un entraînement conséquent est dédié à ce type de pilotage et pourtant, certaines circonstances peuvent provoquer une incapacité temporaire du pilote à déterminer correctement son mouvement réel (et de fait, celui de l'avion) ou son attitude par rapport au sol, et ce même s'il s'agit d'un pilote expérimenté. Ces perceptions erronées (ces illusions) forment ce qu'on appelle la désorientation spatiale.

De nombreuses études ont cherché à déterminer quelle était la part des accidents recensés dans l'aviation militaire attribuable à un épisode de désorientation spatiale. Ces différentes études n'aboutissent pas toujours aux mêmes conclusions à cause de critères de sélection différents ou de l'imprécision de beaucoup de rapports d'accident, par conséquent difficiles à attribuer ou non à la désorientation spatiale. Cependant, on peut estimer que 15 à 20% des accidents avec collision au sol sont dus, au moins en partie, à la désorientation spatiale (Braithwaite et al., 1998b, 1998c ; Cheung et al., 1995 ; Lyons et al., 1994). Cette proportion, malgré les efforts investis pour la lutte contre ces phénomènes, ne semble pas diminuer avec le temps. Outre le coût financier que ces accidents entraînent, la perte en terme de vie humaine est dramatique. Un incident mécanique empêchant le pilotage de l'avion est en général perçu à temps par le pilote qui a le temps de s'éjecter, sauf si l'incident intervient à un moment inopportun ou trop près du sol. Un épisode de désorientation spatiale présente au contraire le danger potentiel de ne donner lieu à aucune prise de conscience de la part du pilote, qui risque alors de diriger son avion au contact du sol sans même tenter de réagir. Une des classifications souvent rencontrée distingue justement les phénomènes de désorientation spatiale en fonction de leurs conséquences sur le pilote. La désorientation spatiale de

type I regroupe les épisodes où le pilote n'est pas conscient de sa perception erronée. La désorientation de type II est reconnue comme telle par le pilote et peut éventuellement être corrigée. Les épisodes de type III correspondent aux désorientations incapacitantes, durant lesquelles le pilote fait l'expérience d'une sensation irrésistible, extrêmement perturbante qui l'empêche de continuer à rétablir la situation. Cette classification insiste sur les conséquences opérationnelles de la désorientation spatiale, sachant que deux épisodes de désorientation peuvent avoir les mêmes causes psychophysiologiques et donner lieu à un type de désorientation spatiale, ou à un autre. La classification qui suit est fondée quant à elle sur l'origine des différents phénomènes de désorientation. Nous allons présenter les cas répertoriés de ce type de phénomènes en présentant brièvement leurs déterminants neurophysiologiques. Nous reviendrons plus en détail sur les caractéristiques des systèmes sensoriels dans la deuxième partie du cadre général.

1.1. Désorientation d'origine visuelle

On estime fréquemment que seuls 10% des cas désorientation spatiale sont d'origine purement visuelle. En fait, la vision reste le sens le plus utile pour fournir des informations sur l'orientation de l'avion par rapport à l'horizon et à la surface de la terre. Dans des conditions de bonne visibilité, le pilote n'a habituellement aucune difficulté à maintenir une attitude de vol correcte à partir des indices visuels extérieurs. Cependant, il arrive, dans certaines circonstances, que les repères visuels extérieurs soient sources d'erreurs. Ils peuvent par exemple être insuffisants pour déterminer l'altitude, comme lors de vols au-dessus de terrains uniformes (la mer, du sable ou de la neige). La plupart des cas de désorientation d'origine visuelle surviennent pendant les phases d'approche de la piste, de jour comme de nuit. De nuit, ils sont souvent liés à la pauvreté de l'environnement visuel, qui ne permet pas de lever certaines ambiguïtés liées par exemple à la perception des distances ou de l'inclinaison du sol. Les systèmes visuels permettant l'appréciation des distances (la vergence oculaire, l'accommodation visuelle) ne sont réellement efficaces que pour juger les distances proches. Au-delà de cinq à six mètres, l'information visuelle de profondeur est essentiellement statique (la connaissance a priori de la forme et de la taille normale des objets, qui nous fait supposer qu'une petite maison est éloignée, alors qu'une grande maison est proche, Fig. 1) et dynamique (la parallaxe de mouvement, qui joue surtout lorsque les mouvements se font dans une direction perpendiculaire à l'axe du regard, ce qui n'est pas le cas lors d'un atterrissage).

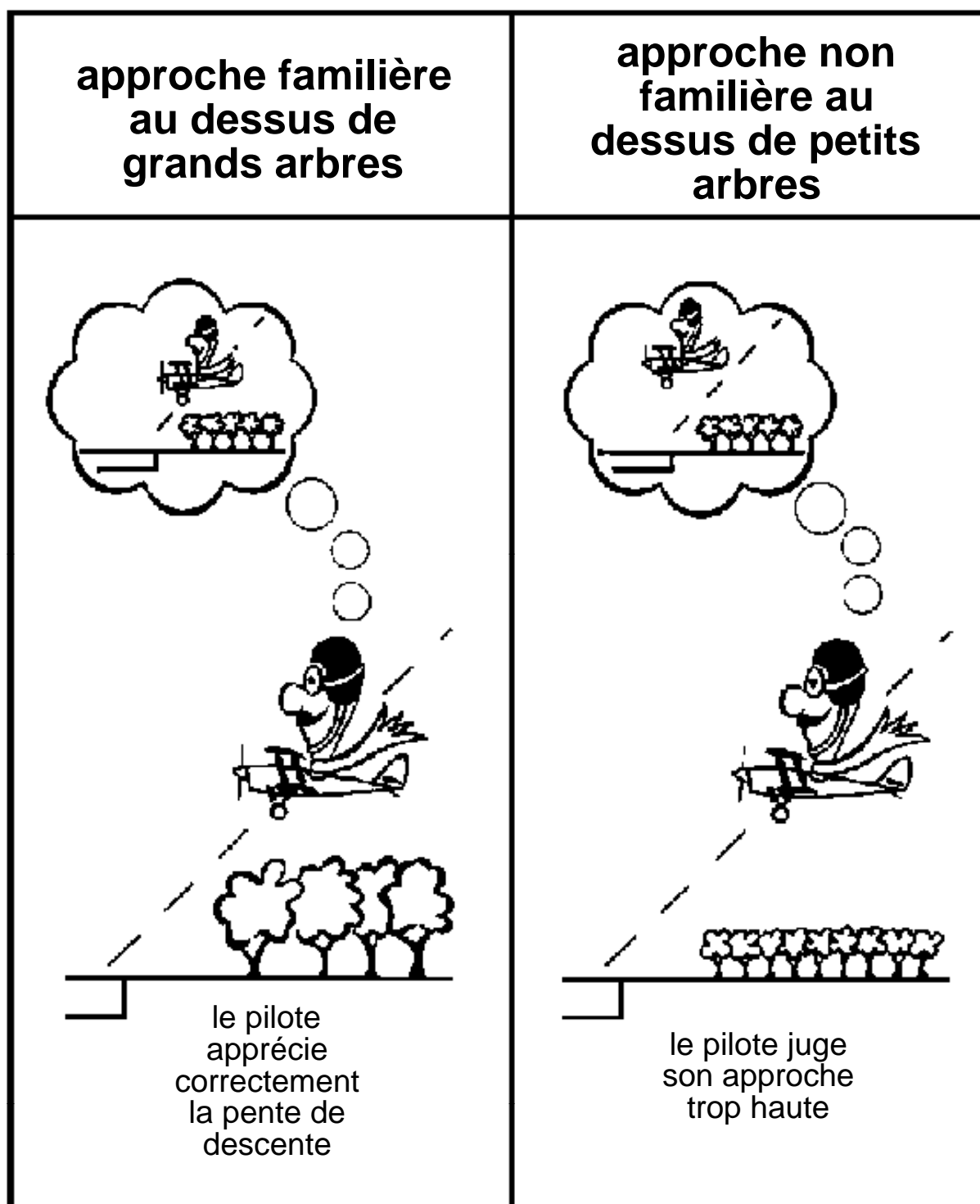


Figure 1 : L'effet d'un environnement non familier lors de la phase d'approche de la piste d'atterrissage. Adapté de Watson (1992).

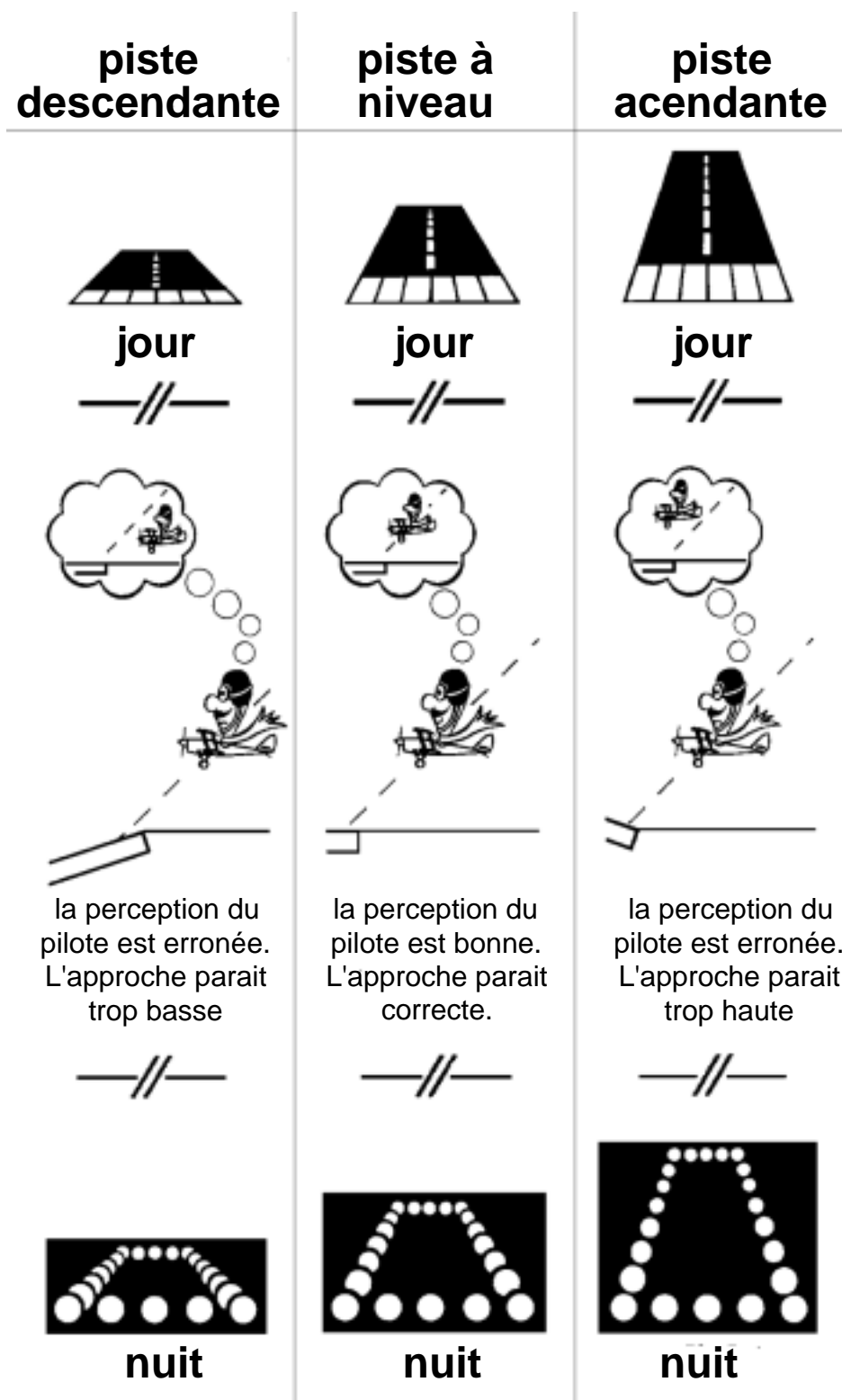


Figure 2 : L'influence de l'inclinaison de la piste pendant une phase d'approche. Le panneau central montre un schéma de l'approche d'une piste normale, horizontale. Les panneaux latéraux montrent une approche correcte d'une piste en pente, conduisant à une perception incorrecte par le pilote. Lorsque la piste descend, le pilote se perçoit comme étant trop bas, alors que, lorsqu'elle monte, il se perçoit trop haut. Adapté de Watson (1992).

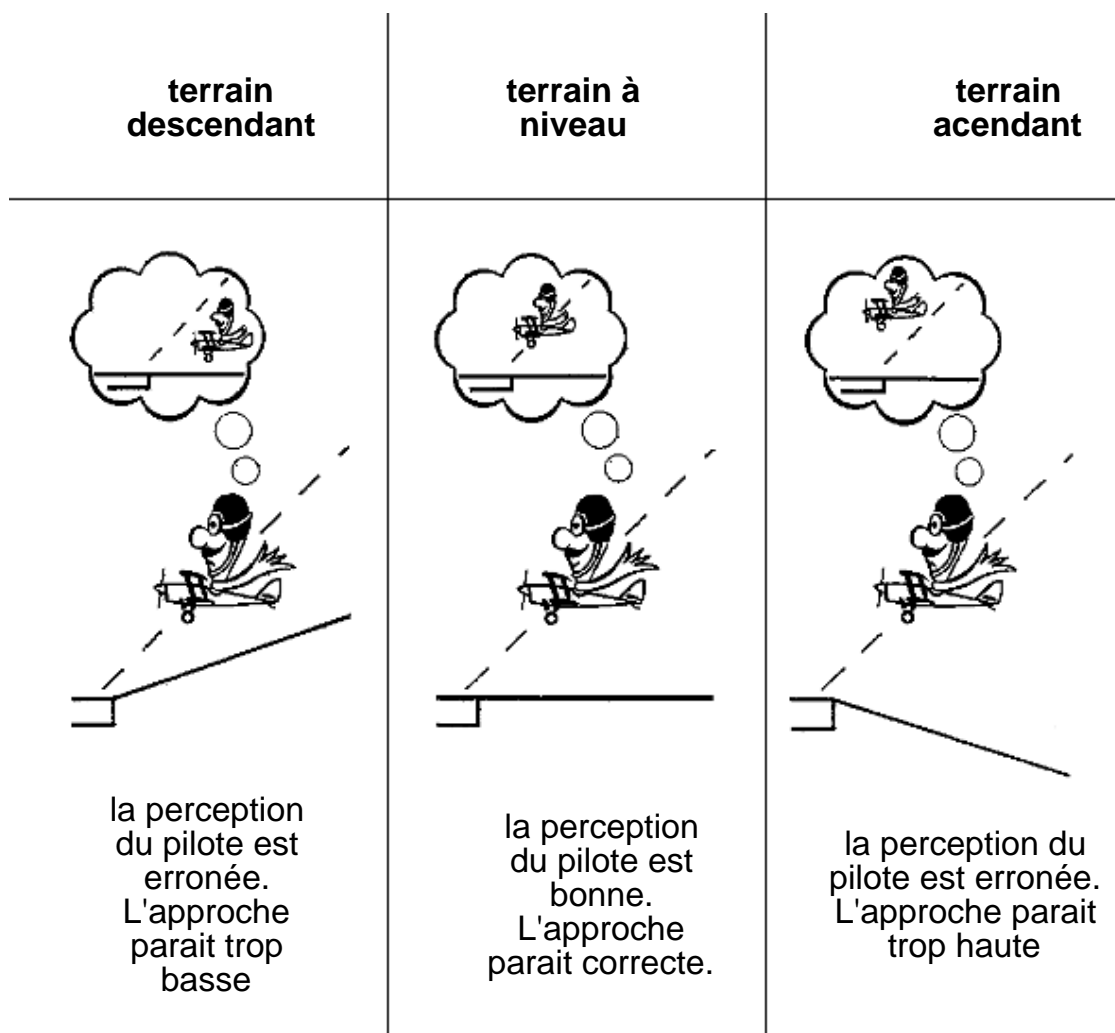


Figure 3 : L'influence de l'inclinaison du terrain avant la piste pendant une phase d'approche. Le panneau central montre un schéma de l'approche sur terrain plat. Les panneaux latéraux montrent une approche correcte d'une piste placée soit en fond de vallée, soit sur un plateau, conduisant à une perception incorrecte par le pilote. Adapté de Watson (1992).

Certaines caractéristiques du terrain peuvent également fournir un horizon biaisé, sur lequel le pilote peut être fortement tenté de s'aligner. Les exemples les plus communs sont un flanc de collines d'inclinaison modérée perçu comme étant plat par le pilote ou l'approche d'une piste d'atterrissage installée sur un terrain incliné (Fig. 2 et Fig. 3). C'est le cas par exemple dans plusieurs altiports des alpes, l'avantage de la pente étant de raccourcir la longueur des pistes (l'avion accélère plus vite au décollage et décélère plus vite à l'atterrissage). Un pilote peu habitué à ce type d'aéroport peut être désorienté et mal aborder la piste. En terrains montagneux, les arbres peuvent aussi être utilisés comme référence verticale, alors qu'en fait, ils ont poussé avec un angle considérable par rapport à la verticale. Le vol entre plusieurs couches nuageuses peut également fournir des références erronées. C'est le cas lorsque, dans certaines

conditions météo, les couches nuageuses sont inclinées par rapport à l'horizontal de 10° ou plus. Là encore, le pilote qui ne surveille pas ses instruments aura fortement tendance à aligner imperceptiblement l'attitude de son avion sur ces repères biaisés.

Un autre type d'illusion, fréquent lors de la traversée de couches nuageuses, est lié à la position du soleil. Si le soleil n'est pas directement visible, les nuages seront clairement plus illuminés dans sa direction. Le pilote, dans ces conditions, peut avoir l'impression que la partie la plus lumineuse des nuages est située à sa verticale. Cette erreur est probablement due à la relation implicite selon laquelle le ciel lumineux est associé à ce qui est en haut et la terre sombre à ce qui est en bas. Si le soleil se trouve sur la gauche de la ligne de vol, le pilote volant à plat peut avoir l'impression d'être incliné vers la gauche et corriger son attitude en conséquence. Si le vol est dirigé vers le soleil, l'illusion correspondra à une attitude d'élévation en tangage.

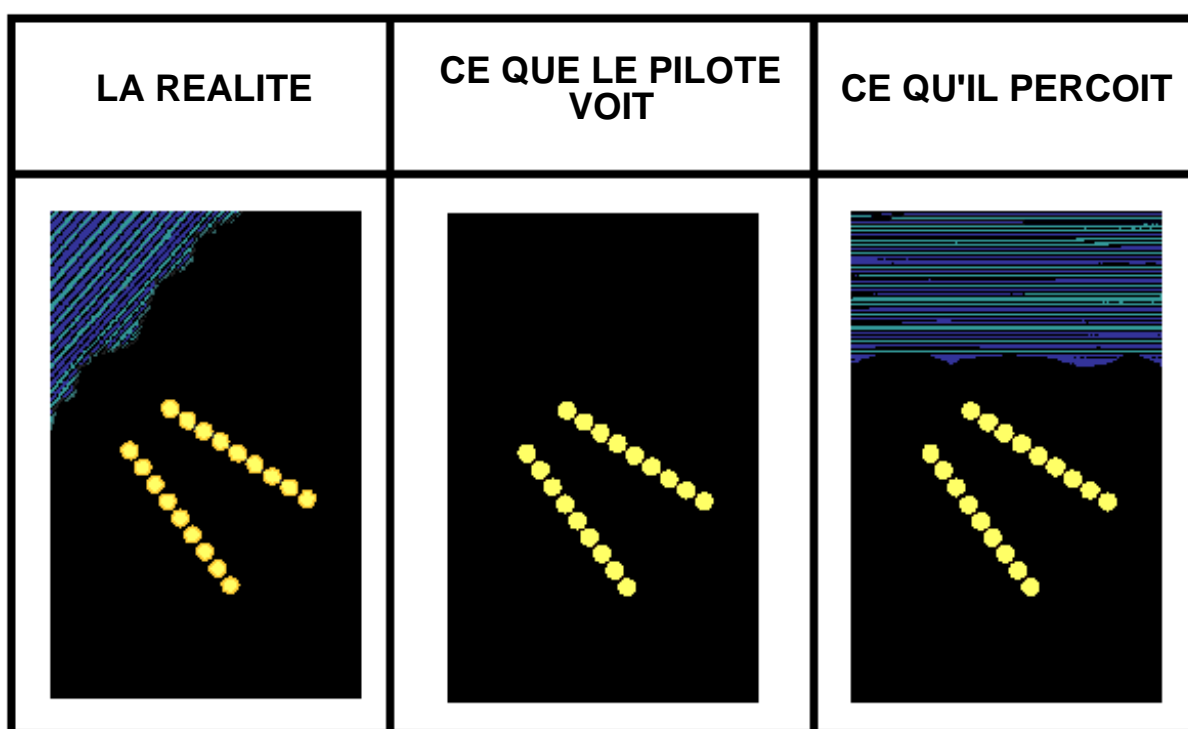


Figure 4 : L'illusion de faux horizon (approche en trou noir). En l'absence d'indices visuels d'horizon, un pilote tend à supposer que son avion vole à plat et peut mal interpréter la perspective des lumières de la piste. Adapté de Watson (1992).

Le vol de nuit est souvent caractérisé par un environnement visuel très pauvre (Fig. 4). De nombreux pilotes ont rapporté avoir confondu les lumières au sol avec les étoiles. Cette illusion est particulièrement fréquente lors de survols de territoires peu habités où les lumières sont dispersées. En relevant la tête pour regarder hors du

cockpit, le pilote peut interpréter les lumières au sol comme étant celles des étoiles et avoir ainsi l'impression forte de voler sur le dos. La même illusion peut survenir en vol à haute altitude, lorsque la lune est perçue comme étant située sous l'horizon subjectif.

Au vu des données que nous venons de présenter, il apparaît que les illusions d'origine visuelles sont des cas ponctuels. Elles sont la plupart du temps le résultat de l'interaction entre un contexte visuel appauvri et des hypothèses incorrectes faites par le pilote à propos des caractéristiques de l'environnement.

1.2. Désorientation d'origine vestibulaire

Si la vision constitue la composante principale de l'équilibration et de l'orientation, c'est le vestibule qui est à l'origine de la majorité des cas de désorientation spatiale. Comme nous le verrons dans la section suivante (§ 2.1.2), cet organe fonctionne de façon adaptée à la locomotion terrestre, mais s'accommode particulièrement mal aux contraintes aéronautiques. Il en découle un nombre assez important d'illusions vestibulaires qui constituent environ 90% des incidents rapportés. On distingue deux grandes classes parmi ces phénomènes, les illusions somatogyrales d'une part, associées au fonctionnement des canaux semi-circulaires, et les illusions somatograviques d'autre part, associées au fonctionnement des otolithes.

1.2.1. Les illusions somatogyrales

Lors d'une rotation à vitesse constante, les propriétés naturelles de ces accéléromètres biologiques que sont les canaux semi-circulaires font que le vestibule cesse d'informer correctement le système nerveux central sur la vitesse de rotation après quelques secondes. Le principe général de fonctionnement des canaux semi-circulaires est simple. Ils contiennent un liquide, l'endolymphe, qui se déplace avec une certaine inertie dans les canaux et qui provoque le déplacement d'un volet gélatineux, la cupule. Les mouvements de la cupule sont convertis en impulsions nerveuses, transmises au système nerveux central par le nerf vestibulaire (cf. § 2.1.2.2, pour plus de détail). Les propriétés du système font que les canaux semi-circulaires ne sont sensibles qu'aux accélérations. Par conséquent, lorsqu'un pilote s'engage dans une manœuvre incluant des rotations durables avec peu ou pas de variation de vitesse (virage, tonneau, vrille, spirale), il se place dans des conditions favorables à l'apparition d'illusion vestibulaire. Lors d'une telle manœuvre, les signaux émis par les canaux semi-circulaires

s'estompent progressivement au cours des 20 premières secondes suivant l'arrêt de l'accélération angulaire. A ce moment, seules les données visuelles, celles fournies par le monde extérieur ou par l'instrumentation, permettent au pilote de percevoir la rotation.

Lorsqu'une vrille se déroule dans des conditions de mauvaise visibilité, une situation extrêmement dangereuse, appelée communément «la vrille du cimetière», peut s'établir. La figure 5 présente la succession des événements. Lorsque le pilote s'engage dans la vrille, les cupules des canaux semi-circulaires sont défléchies par l'accélération (1). La vrille se poursuit alors à vitesse constante et se prolonge suffisamment pour que les cupules des canaux semi-circulaires reviennent, partiellement ou totalement, à leur position de repos (2). La sensation de rotation est alors faible ou absente. Lorsque le pilote exécute les manœuvres de sortie de vrille, les cupules sont défléchies et une sensation de rotation en sens inverse de la précédente apparaît, faisant croire à l'établissement d'une nouvelle vrille, opposée à celle d'origine (3). Le pilote exécute les manœuvres de sortie de cette vrille imaginaire et part à nouveau en vrille dans le même sens qu'auparavant (4).

Contrairement à ce qui se passe dans une vrille, au cours de laquelle l'avion tombe, il vole lorsqu'il est en spirale : il descend rapidement en virant. La vitesse en virage étant constante, le pilote cesse au bout d'un certain temps de percevoir qu'il tourne. Il ne peut se rendre compte que de sa perte d'altitude. Pour arrêter sa descente, il est tenté de tirer sur le manche et de pousser sur la manette des gaz. En fait, cette manœuvre n'aboutirait qu'à resserrer la spirale. Pour l'arrêter, il faut que le pilote remette d'abord les plans de son appareil à l'horizontale, grâce à de bonnes références visuelles extérieures ou à une confiance totale dans les instruments de bord.

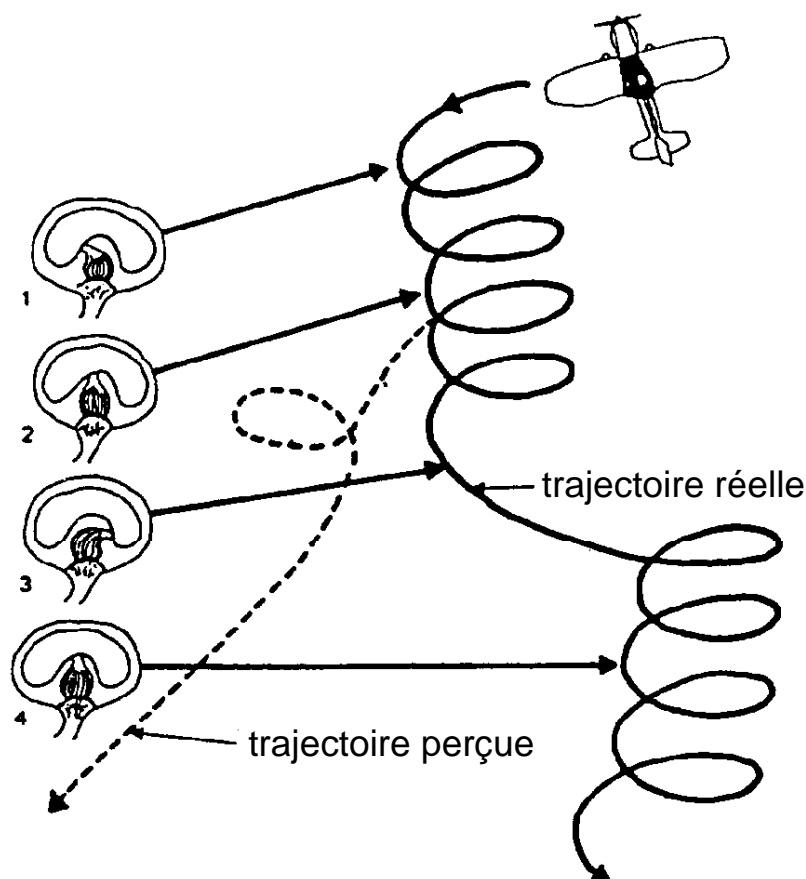


Figure 5 : La «vrille du cimetière». Les trajectoires réelle et perçue sont mises en rapport avec l'état des cupules durant la manœuvre. D'après Colin et Lienhart (1999).

L'effet de Coriolis est également une illusion très dangereuse. Elle apparaît lorsque les cupules d'une paire de canaux semi-circulaires sont revenues à leur position de repos au cours d'un virage à vitesse constante (la sensation de rotation a donc là aussi disparu) et que le pilote exécute un mouvement de bascule de la tête dans un autre plan que le plan de rotation de l'avion. La paire de canaux semi-circulaires qui était au repos est à nouveau excitée, puisqu'elle sort du plan de rotation. Une autre paire de canaux pénètre dans le plan de rotation et se trouve stimulée. Le phénomène entraîne une sensation puissante et erronée de rotation dans un plan différent de celui de la rotation réelle. Prenons, par exemple, le cas d'un pilote effectuant un virage à gauche à vitesse constante pendant un temps assez long pour que les cupules des canaux semi-circulaires horizontaux soient revenues à leur position de repos. Désirant consulter un indicateur situé sur une banquette latérale, il incline fortement la tête en avant. Les canaux semi-circulaires horizontaux sortent du plan de rotation de l'avion, alors que les canaux semi-circulaires verticaux viennent s'y placer, au moins partiellement. Les cupules des canaux horizontaux dévient, indiquant une rotation dans leur nouveau plan,

celui du roulis. Les cupules des canaux verticaux dévient également, signalant aussi une rotation dans le plan du lacet. La combinaison de ces influx est une sensation de rotation brutale. D'une façon générale, le principal effet du mouvement de la tête dans un axe, au cours d'une rotation s'effectuant autour d'un autre axe, est de faire naître la sensation erronée de rotation autour d'un troisième axe orthogonal. Le phénomène de Coriolis intervient de manière soudaine et inattendue, souvent à un moment où le pilote a son attention focalisée sur un aspect particulier de son travail aérien, ce qui le rend particulièrement dangereux lorsqu'il survient près du sol. Il est à noter également que les nouvelles technologies de vol permettant de découpler l'attitude de l'avion et la ligne de vol sont susceptibles de provoquer des stimulations équivalentes à celles que nous venons de décrire (Pancratz et al., 1994).

Le vertige alternobarique (ou vertige de pression) est un autre cas de désorientation spatiale de nature violente. Il est dû à une défaillance des mécanismes qui permettent de maintenir un équilibre de pression dans les cavités de l'oreille moyenne. Classiquement, lors d'une phase de prise ou de perte d'altitude, le pilote entend un son bref lorsque l'air entre ou sort brusquement de l'oreille moyenne par la trompe d'Eustache. Ce changement soudain de pression dans l'oreille moyenne se répercute dans l'oreille interne et provoque un mouvement de l'endolymphe, et par conséquent de la cupule, dans un ou plusieurs canaux semi-circulaires. La sensation intense qui en découle peut s'accompagner de troubles de la vision ou d'une perception de déplacement de la scène visuelle. Elle s'estompe généralement au bout de 10 à 15 s, mais un léger vertige peut persister plus longtemps. La direction de l'illusion peut être dans n'importe quel plan, même s'il semble qu'elle reste constante quand elle se répète chez un individu. Certains pilotes semblent être plus souvent victimes du vertige alternobarique que d'autres, mais, de façon générale, le risque est potentialisé lors d'affections, même mineures (comme un simple rhume) des voies respiratoires.

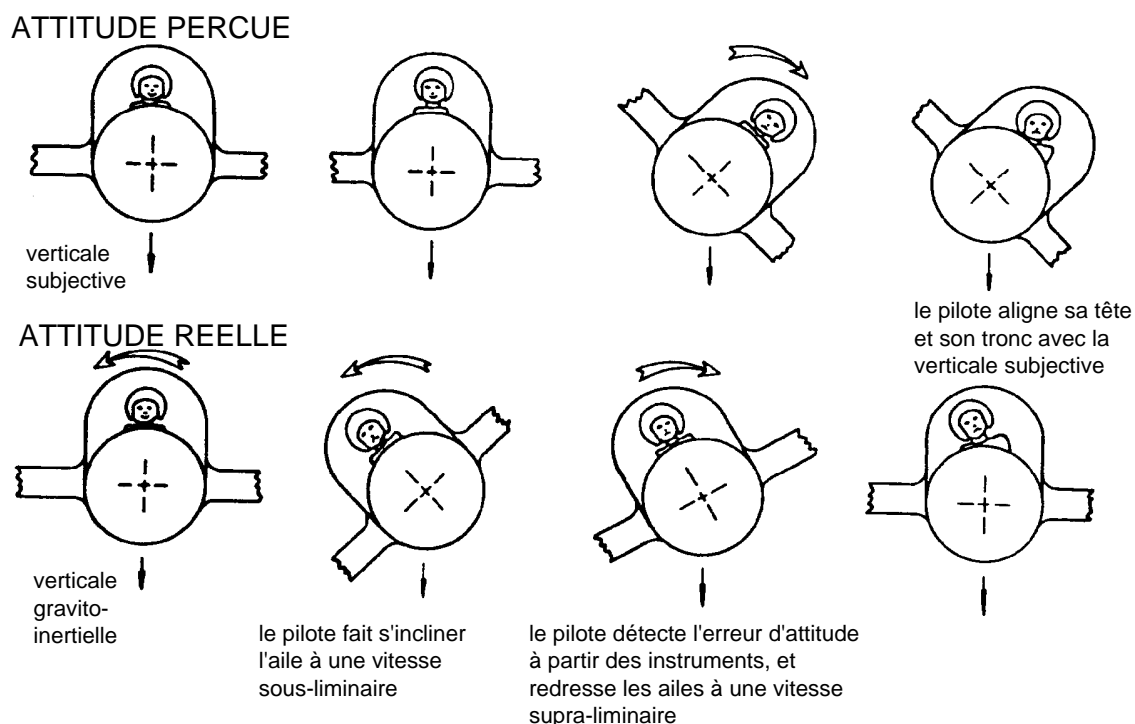


Figure 6 : Illusion d'inclinaison consécutive à un mouvement en roulis sous le seuil d'activation des canaux semi-circulaires. D'après Benson (1973).

Un dernier type d'illusion associé au fonctionnement des canaux semi-circulaires résulte du manque de sensibilité de ces organes lors de dérive lente de l'attitude de l'avion en roulis. Prenons le cas d'un pilote qui laisse son avion dériver à droite (figure 6), distrait de la surveillance de l'assiette de son appareil par une autre tâche. Il peut s'agir, par exemple, d'une vitesse angulaire de roulis de $0,20^{\circ}.s^{-1}$ pendant 10 s. D'après la loi de Mulder (cf. § 2.2.2), ce mouvement n'est pas perçu. Au bout de ces 10 s, le pilote s'aperçoit de l'inclinaison de son avion et corrige immédiatement son assiette, avec une vitesse de roulis de $20^{\circ}.s^{-1}$, nettement au-dessus du seuil de perception des canaux semi-circulaires. La sensation qu'il éprouve, une fois la manœuvre achevée, est celle d'une inclinaison vers la gauche. Il ressent alors un désir puissant d'incliner l'avion à droite pour faire cesser cette illusion, bien que l'attitude normale de l'avion lui soit indiquée par ses instruments. Ces sensations sont si fortes que le pilote s'incline vers la verticale perçue ou même s'appuie sur une paroi latérale du cockpit pour «garder son équilibre». Habituellement, le pilote fait confiance à son horizon artificiel et s'efforce d'ignorer la sensation. Cependant, une fois que son attention a été attirée vers elle, il peut lui être difficile de s'en débarrasser, s'il n'a pas à sa disposition de références visuelles prégnantes, et la sensation peut persister pendant plusieurs minutes, voire plus d'une heure. Le pilote est alors l'objet d'un conflit sensoriel, résolu puisqu'il pilote correctement, mais source de tension et de fatigue.

1.2.2. Les illusions somatograviques

Au cours du vol, l'organisme est soumis, du fait des mouvements de l'avion, à un ensemble de forces (force d'inertie, force centrifuge...) qui s'ajoutent au champ de pesanteur terrestre. Il s'agit là d'un phénomène spécifique et nouveau, parce que l'homme est habitué à vivre dans le champ de pesanteur terrestre, toujours constant. L'action la plus immédiate se fait sentir sur l'appareil otolithique dont nous verrons qu'il est incapable de faire la distinction entre la force de gravité terrestre et les accélérations linéaires provoquées par un déplacement (§ 2.1.2.1).

Lors d'une accélération dirigée dans le sens du vecteur vitesse de l'avion (augmentation de la puissance du moteur, rentrée des aérofreins) ou en sens inverse (sortie des aérofreins), la force d'inertie qui l'accompagne se compose avec la force de pesanteur pour donner une résultante gravito-inertielle inclinée par rapport au champ de pesanteur (Fig. 7). Une accélération linéaire de 0,45 G, par exemple, donne lieu à un vecteur résultant de 1,1 G incliné de 24° vers l'arrière. Les otolithes sont stimulés de la même manière que par une bascule du corps vers l'arrière. En l'absence de repères visuels extérieurs, le pilote a l'impression que l'avion se cabre. Il peut alors être tenté de pousser sur le manche en avant pour corriger son assiette, au risque de venir percuter le sol. Il faut, en général que l'accélération en cause soit de longue durée, de l'ordre de la minute, pour que ces illusions se développent complètement. Elles apparaissent néanmoins pour des accélérations intenses ne durant que quelques secondes, lors de décollages catapultés par exemple (Cohen, 1977).

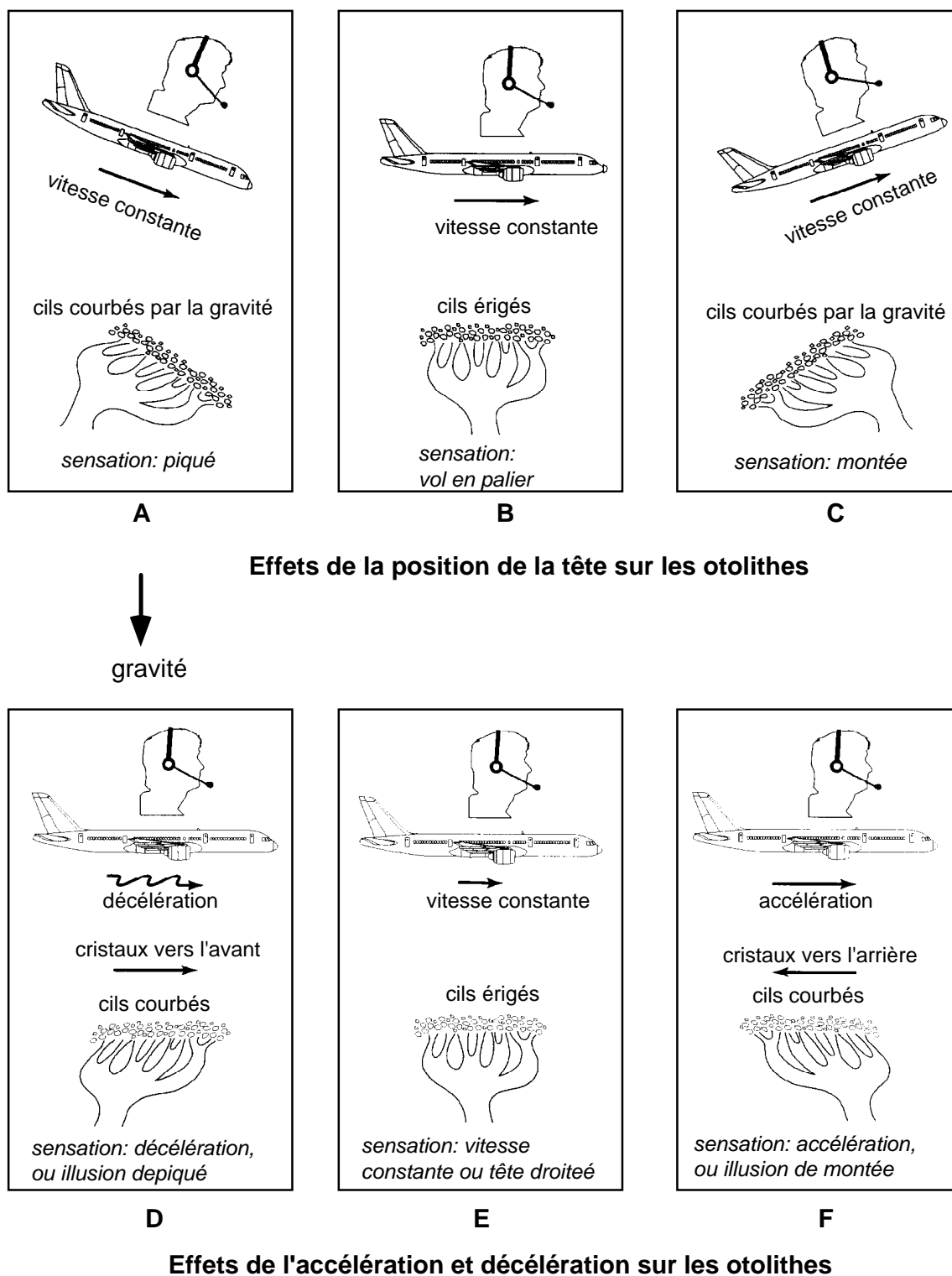


Figure 7 : Effets des inclinaisons de l'avion dans le plan du tangage (partie supérieure) et des accélérations linéaires lorsque l'avion vole à plat (partie inférieure). Chaque schéma met en rapport les caractéristiques du mouvement de l'avion (attitude et vitesse) et l'état de stimulation des otolithes correspondant. On observe alors que, lors d'accélérations ou de décélérations, la stimulation des otolithes est identique à celle provoquée par une inclinaison effective de l'avion, respectivement vers l'arrière et vers l'avant.

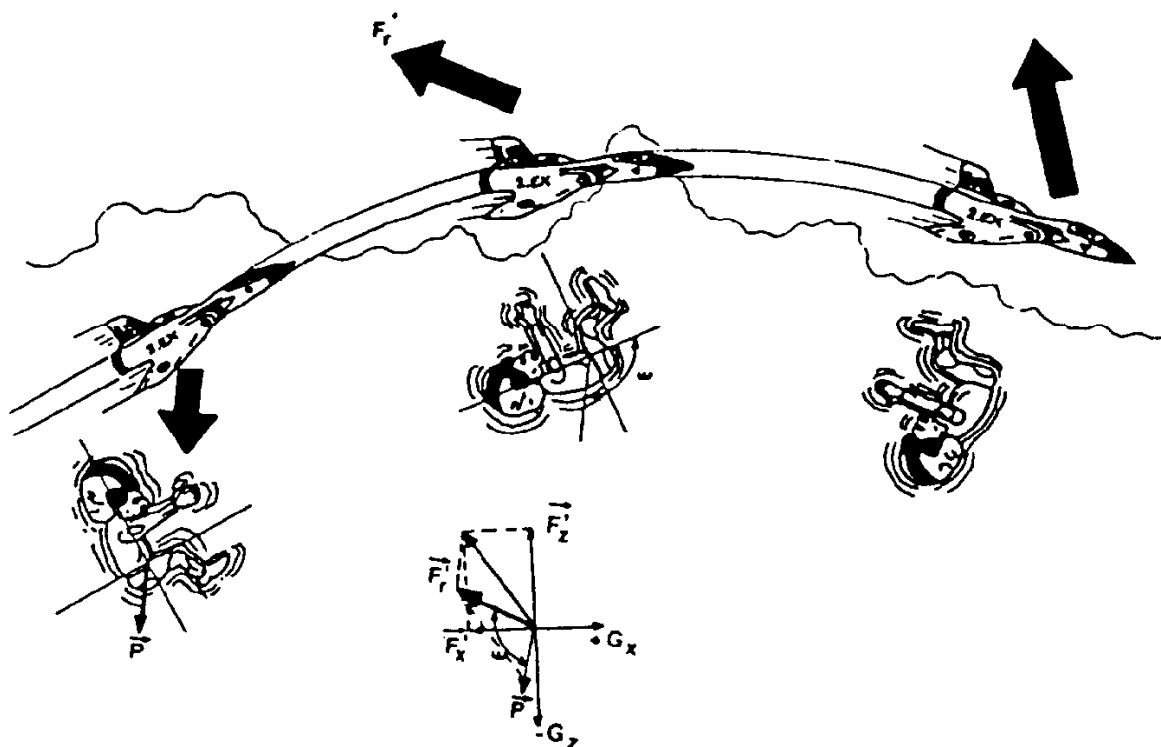


Figure 8 : L'illusion somatogravique d'inversion. D'après Colin et Lienhart (1999).

Un autre type d'illusion somatogravique peut apparaître lorsque l'avion suit une trajectoire courbe en accélérant (McCarthy et Stott, 1994). Envisageons, par exemple, le rétablissement succédant à une montée rapide dans des conditions de mauvaise visibilité (Fig. 8). Trois forces sont en jeu : la force d'inertie F'_x , correspondant à l'accélération $+G_x$ de l'avion qui prend de la vitesse pendant le rétablissement, la force d'inertie centrifuge F'_z , correspondant à l'accélération $-G_z$ de l'avion qui suit une trajectoire curviligne, et la force de pesanteur verticale P . Ces trois forces se composent en une résultante $F'r$ orientée en haut et en arrière. Captée par les otolithes, cette «gravité négative» induit l'illusion d'une bascule en arrière, qui peut aller jusqu'à la sensation de se retrouver en position inversée. Le pilote peut alors être tenté de pousser le manche en avant de façon réflexe. Cette manœuvre n'aboutirait qu'à une accentuation de l'illusion, puisque les accélérations $+G_x$ et $-G_z$ augmenteraient lors de la mise en piqué de l'avion, et risque de placer l'appareil dans une configuration de vol dont la sortie serait très difficile.

Lors de virages de longue durée à vitesse constante, des illusions très convaincantes de mouvement en roulis ou en tangage peuvent apparaître brusquement lorsque le pilote bouge la tête (Guedry et Rupert, 1991 ; Lyons et al., 1990). L'étude de ce phénomène, le «G excess effect», a montré qu'il ne s'agissait pas d'un effet de

Coriolis dans ces situations où le rayon de virage est suffisamment grand pour que la vitesse de rotation soit inférieure à $5^{\circ}.s^{-1}$. Ces illusions sont plutôt provoquées par la stimulation exagérée des otolithes, conduisant à une mauvaise interprétation des mouvements de la tête, donc du corps et de l'attitude de l'avion.

Lors d'un virage incliné qui se prolonge, les otolithes et les récepteurs somesthésiques du pilote sont stimulés par la résultante gravito-inertielle, alignée sur l'axe corporel du pilote tant que le virage est correct. Si l'avion glisse ou dérape, la résultante gravito-inertielle s'écarte alors brusquement de l'axe perpendiculaire au plancher de l'avion. Le pilote a alors la sensation de s'incliner, en sens inverse de l'inclinaison normale de l'avion en cas de dérapage, dans le même sens en cas de glissade.

Les illusions d'origine vestibulaire, bien qu'étant les plus fréquentes, sont celles pour lesquelles il existe le moins de possibilités de traitement technologique : contrairement à la vision, pour laquelle il est possible de fournir une information synthétique, il n'existe pas de moyen simple de stimuler le sens vestibulaire. Ce genre d'illusion est généralement traité lors de la formation des pilotes, en leur apprenant à reconnaître ces sensations d'une part, et à négliger les informations qui les provoquent d'autre part.

1.2.3. Les illusions visuo-vestibulaires

Les réflexes vestibulo-oculaires sont destinés à stabiliser le regard dans l'espace. Il s'agit de mouvements compensateurs des yeux destinés à garder l'axe du regard vers un point donné de l'espace, lors d'une rotation de la tête. Par exemple, si la tête tourne de la droite vers la gauche, le réflexe va provoquer une réorientation des yeux dans leurs orbites, par un mouvement de la gauche vers la droite. En vol, les stimulations vestibulaires générées influencent ces réflexes et provoquent des déplacements illusoire de la scène visuelle. Il existe deux types d'illusions visuo-vestibulaires, les illusions oculogyres (ou oculogyrales), qui accompagnent les illusions somatogyrales, et les illusions oculograviques, qui accompagnent les illusions somatograviques. Ces deux types d'illusion ne surviennent que si la scène visuelle est appauvrie, lors d'un vol de nuit par exemple.

L'illusion oculogyre prend place lors d'accélération angulaires stimulant les canaux semi-circulaires. Les informations vestibulaires provoquent l'apparition d'un nystagmus, c'est-à-dire une succession de battements des yeux. Un premier effet de ce

phénomène est de troubler la vision des instruments et du monde extérieur. Le nystagmus disparaît par la suite, mais il subsiste un mouvement résiduel des yeux, de faible amplitude, mais ayant, comme le nystagmus, une composante lente et une composante rapide. Or, il semble que la composante lente soit mieux détectée que la composante rapide et le système nerveux central interprète alors les informations rétiniennes comme un mouvement de la scène visuelle dans le même sens que la rotation (Howard, 1986).

Les illusions oculograviques apparaissent suite à des accélérations verticales brutales provoquées par une turbulence (Fig. 9) ou le rétablissement après une descente rapide. La stimulation du système otolithique provoque un réflexe vestibulo-oculaire, qui bascule les yeux vers le bas. Le pilote a alors l'illusion d'un déplacement du tableau de bord vers le haut. Ce déplacement est interprété, en l'absence de références visuelles extérieures correctes, comme le résultat d'un mouvement de cabré de l'avion. Une illusion de piqué s'observe dans les conditions inverses des précédentes.

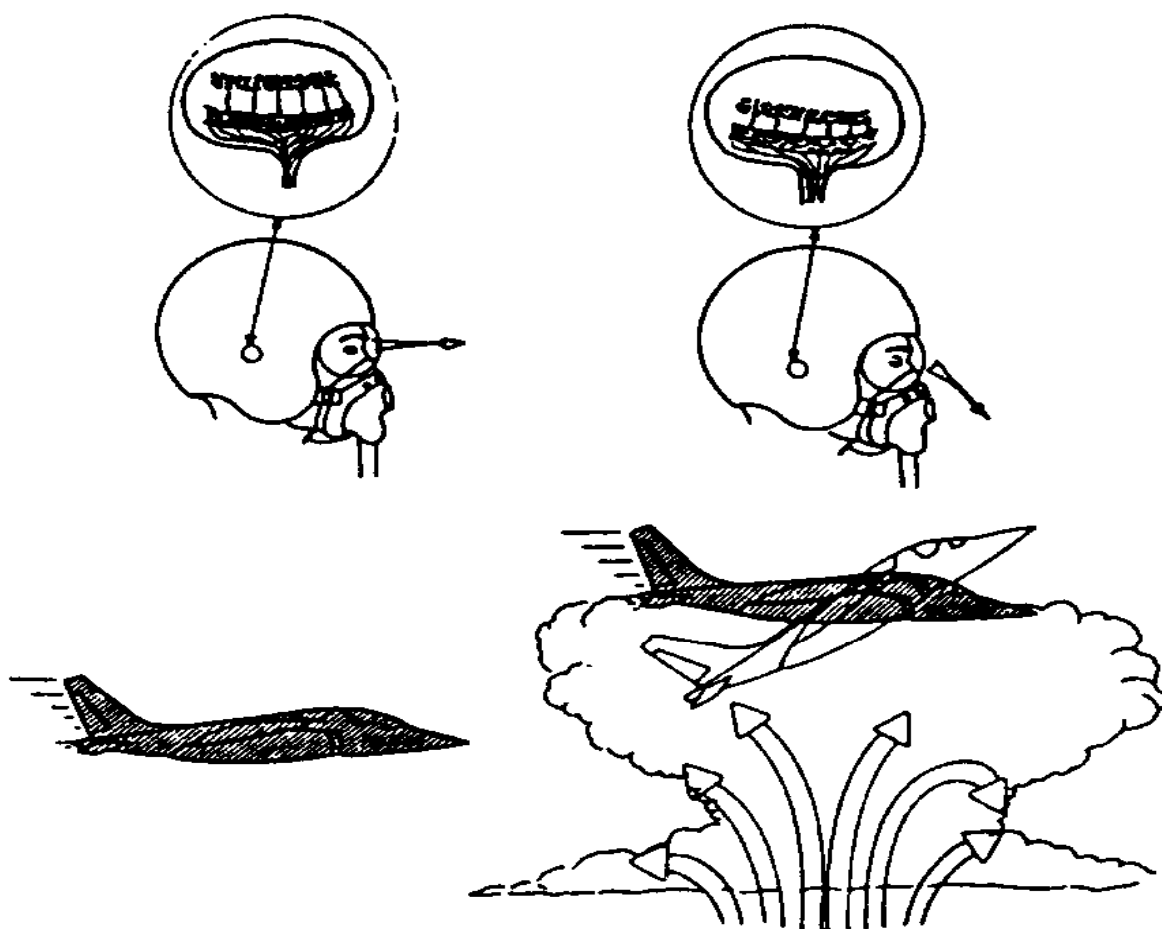


Figure 9 : L'illusion oculogravique. D'après Colin et Lienhart (1999).

1.3. Autres phénomènes liés à la désorientation spatiale

1.3.1. Le phénomène du break-off

Le phénomène du «break-off» apparaît durant des phases de vol très monotones, particulièrement à haute altitude (30000 pieds) quand l'horizon est mal défini. Ce phénomène consiste en la perception altérée de la relation entre le pilote et son appareil. Le pilote se sent détaché, isolé de l'avion qu'il contrôle. La plupart du temps, il s'agit d'une impression, d'un sentiment modéré, mais des cas extrêmes de sensation de désincarnation ont été rapportés. Dans ces cas, les pilotes se percevaient comme flottant à l'extérieur du cockpit en s'observant soi-même aux commandes de l'avion. Ce phénomène, quoique potentiellement très alarmant pour un pilote non informé (Bohnker et al., 1991), est rarement associé à une perte d'orientation dans l'espace. De plus, elle apparaît uniquement dans des phases de vol très calmes. Le danger associé à ce phénomène est donc négligeable.

1.3.2. Le phénomène de la main géante

Le phénomène de la main géante peut être ressenti à la suite de plusieurs types de désorientation spatiale, comme l'effet de Coriolis ou le vertige alternobarique. Il s'agit de l'incapacité du pilote à manipuler le manche comme il le souhaite (Slater, 1993). Une impression de résistance des commandes est ressentie, comme si une main géante appuyait sur l'une des ailes et empêchait le pilote de rétablir une attitude souhaitée. Curieusement, il suffit au pilote de saisir le manche par le bout des doigts pour reprendre le contrôle (Lyons et Simpson, 1989). Les mécanismes générateurs de ce phénomène et l'effet bénéfique du contrôle digital restent largement inconnus, dans la mesure où les cas en vol restent rares et qu'il n'a jamais été possible pour l'instant de les répliquer en laboratoire de façon satisfaisante (Weinstein et al., 1991).

2. Les mécanismes de l'orientation spatiale

Comprendre la désorientation spatiale, c'est d'abord comprendre les mécanismes qui permettent à l'Homme de s'orienter dans l'espace et de se déplacer dans le monde qui l'entoure. Cette faculté à s'orienter correctement dans l'espace repose sur un processus d'intégration d'informations sensorielles variées issues de différents capteurs: l'œil, l'appareil vestibulaire et les récepteurs somesthésiques principalement. Chacun d'eux possède ses propres caractéristiques et fournit une somme d'informations utiles pour s'orienter, mais, nous le verrons, pas toujours suffisante. L'ensemble de ces entrées sensorielles est pris en charge par des processus intégratifs mettant en jeu des structures supérieures du système nerveux central, pour élaborer une représentation adaptée des relations entre le corps propre et l'environnement. Une telle représentation doit pouvoir être accessible à tout instant à la conscience de l'individu pour lui permettre d'adapter ses actions et ses intentions à un contexte donné. La nécessité d'une représentation conforme à la réalité s'impose alors. Pour toutes ces raisons, la perception de l'orientation spatiale constitue un modèle privilégié d'étude des capacités intégratives et adaptatives du système nerveux.

La synthèse qui suit n'est pas exhaustive. Trois modalités sensorielles seulement (la vision, le système vestibulaire et la somesthésie) y sont développées, alors que l'audition participe également, mais dans une nettement moindre mesure, à l'orientation spatiale. De plus, nous ne présenterons que les connaissances les plus pertinentes pour la compréhension de la désorientation spatiale et des moyens de lutter contre.

2.1. Les systèmes sensoriels

2.1.1. *La vision*

La vision est sans conteste la modalité sensorielle dominante chez l'Homme. C'est par la vision que nous obtenons le plus d'information de notre environnement ; c'est elle dont l'altération provoque les handicaps les plus difficiles à surmonter ; c'est également elle qui permet le plus souvent de compenser les déficits des autres sens. Il n'est donc pas étonnant que ce soit par cette modalité sensorielle que l'essentielle des informations utiles pour lutter contre la désorientation spatiale sont fournies.

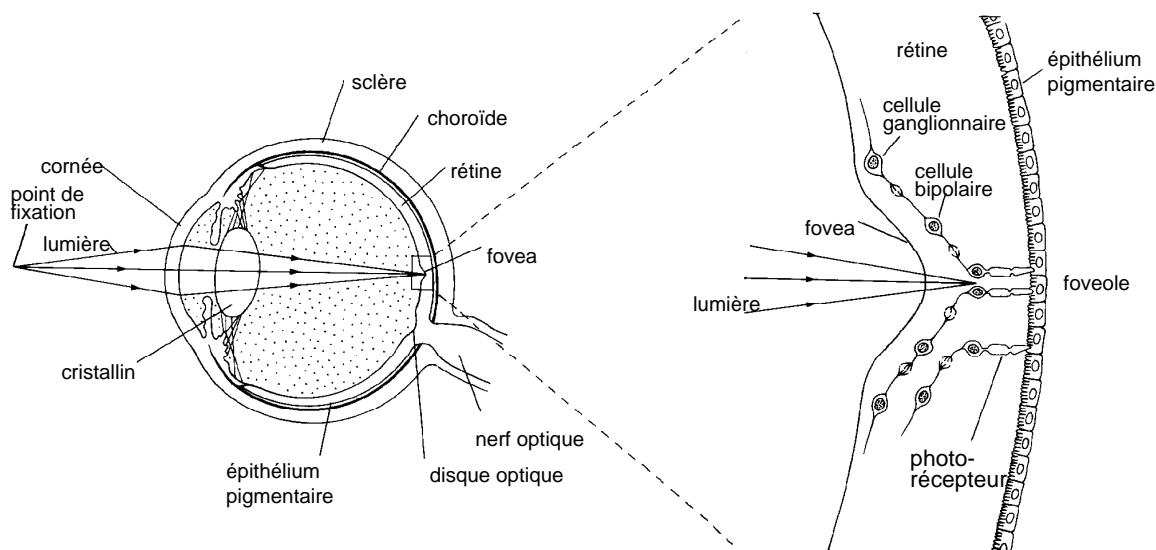


Figure 10 : Schéma de l'œil et de la rétine. Les photorécepteurs sont localisés dans la rétine. La partie centrale de la rétine, ou fovéa, est celle qui permet la discrimination fine (c'est là que l'acuité est maximale). La rétine périphérique est plus sensible au mouvement, mais la définition est moins bonne. Pour pouvoir examiner de façon attentive un objet, il est donc nécessaire de bouger l'œil pour amener l'image de l'objet en question à se projeter sur ou près de la fovéa.

Si la vision est habituellement considérée comme un sens unique et indivisible, les centres cérébraux chargés de recevoir et d'analyser l'information fournie par l'œil sont organisés en deux systèmes qui n'ont pas les mêmes fonctions. Classiquement on considère que l'un est essentiellement chargé de *localiser* les objets, de repérer les lieux et les positions et que l'autre est chargé de les *identifier*, d'analyser leur forme et leurs qualités (Held, 1968 ; Schneider, 1969 ; Trevarthen, 1968). Cette distinction fonctionnelle prend son point de départ dans la rétine (Fig. 10). Sa partie la plus centrale, la fovéa, ne couvre qu'une dizaine de degrés du champ visuel, mais sa résolution spatiale est très élevée. Elle est donc particulièrement bien adaptée à l'analyse des détails d'un objet fixé. On retrouve une large représentation rétinotopique de la rétine centrale sur les corps genouillés latéraux, qui projettent eux-mêmes vers le cortex visuel primaire (V1). A l'opposé, la rétine périphérique couvre un champ visuel large, mais sa résolution spatiale est faible. Les cellules qui la composent sont plus adaptées à la détection des changements de luminance, c'est-à-dire des mouvements, perçus en périphérie. Les afférences de la rétine périphérique se projettent majoritairement par la voie «extra-genouillée» qui inclut les collicules. La coopération entre les deux systèmes apparaît comme essentielle en raison de l'étroitesse du champ que la fovéa peut analyser. Si ce «pinceau» très fin n'était pas constamment redirigé

dans toutes les directions de l'espace susceptibles d'apporter une information utile, c'est l'ensemble du mécanisme visuel qui deviendrait inadapté. Or, c'est d'abord le système localisateur qui provoque ce constant «échantillonnage» d'informations. C'est alors le rôle du système oculomoteur de rediriger le regard vers les zones où l'information doit être prélevée.

Ungerleiden et Mishkin (1982) mettent en évidence le fait que cette subdivision fonctionnelle de la vision s'étend chez l'homme aux cortex cérébral, en identifiant deux voies visuelles dans le cortex du singe (Fig. 11) : une voie ventrale qui projette du cortex visuel primaire (V1) vers le cortex inféro-temporal, et une voie dorsale projetant de V1 vers le cortex pariétal postérieur. La partie des informations rétinienne périphériques qui emprunte la voie sous-corticale passant par le colliculus supérieur et le pulvinar aboutit également au cortex pariétal postérieur. Ungerleiden et Mishkin (1982) identifient la voie ventrale comme étant spécialisée dans la perception fine et la reconnaissance des objets et s'y réfèrent en disant qu'elle répond à la question «quoi ?». Elle tirerait principalement ses informations de la vision fovéale (ou focale). Le système localisateur, empruntant la voie dorsale, serait spécialisé dans le traitement des informations spatiales et répondrait quant à lui à la question «où ?». Il reposerait sur les informations apportées par la vision périphérique (ou ambiante). Cette distinction faite entre les fonctions respectives des voies ventrale et dorsale apparaît être une approximation valide qui rend compte de nombreuses observations expérimentales. Selon ce point de vue, la contribution de la vision à l'orientation spatiale dépendrait essentiellement du système dorsal.

La théorie du «quoi?» et du «comment?» de Milner et Goodale (1995) diverge de la traditionnelle dichotomie «perception de l'objet» et «perception de l'espace» dans la mesure où elle met l'accent sur l'importance du but de l'observateur. Leur théorie distingue en fait les deux systèmes visuels par le type de comportements ou de représentations qu'ils sous-tendent. La voie ventrale participerait à l'expérience consciente du monde (la perception, le «quoi?»), alors que la voie dorsale traiterait l'information nécessaire aux transformations visuo-motrices (l'action, le «comment?»). Les deux voies utiliseraient donc les mêmes informations, qu'elles soient spatiales ou relatives aux objets, mais les transformeraient pour des finalités différentes. Pour Milner et Goodale (1995), la voie ventrale participe à la construction de référentiels exocentrés (indépendant du point de vue de l'observateur, cf. § 2.2.2 pour la notion de référentiel spatial) qui servent la perception consciente de la structure du monde et de son

invariance. Ces processus perceptifs utiliseraient des référentiels relatifs centrés sur un objet ou sur une référence environnementale, dans lesquels les attributs et la signification des objets seraient traités. En revanche, la voie dorsale transformerait l'information visuelle caractérisant la localisation, l'orientation et la taille des objets dans des coordonnées principalement égocentriques, orientées vers des actions telles que le pointage ou les mouvements de saisie. Les fonctions des deux voies visuelles se différencient également par leur implication dans le temps. Si le but est de représenter un objet visuel sur la durée, c'est une fonction du système ventral. S'il faut agir immédiatement sur l'objet, la voie dorsale est alors sollicitée. Selon ce point de vue, la voie ventrale contribuerait largement à l'orientation spatiale, puisqu'elle permettrait de traiter l'information en référence aux repères de l'environnement.

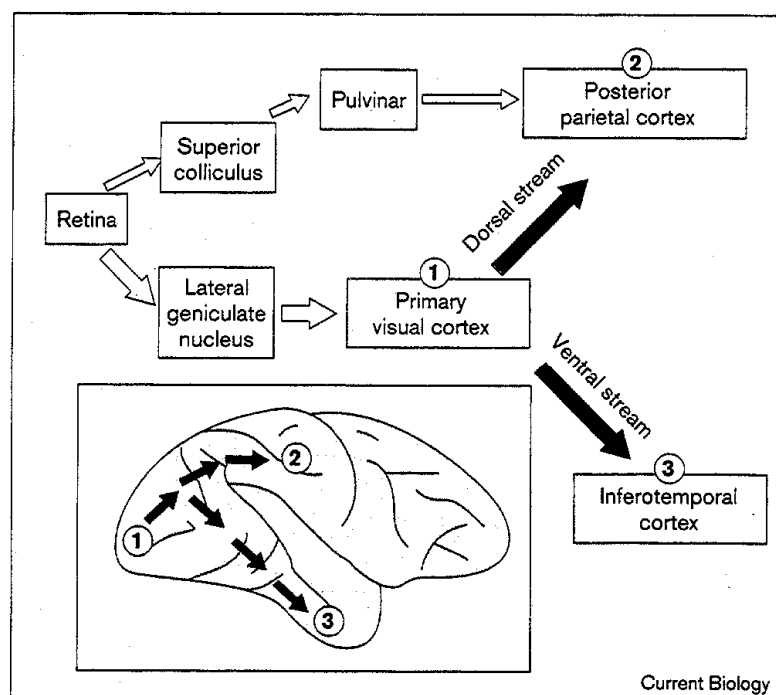


Fig. 11 : Voies principales empruntées par les afférences rétiniennes jusqu'aux aires associatives ② et ③. Le diagramme représentant un cerveau de macaque montre le chemin approximatif des projections cortico-corticales depuis V1 ① vers le cortex pariétal postérieur ② (voie dorsale) et vers le cortex inféro-temporal ③ (voie ventrale). Extrait de Goodale (1998).

Creem et Proffitt (2001) réconcilient les points de vue de Ungerleiden et Mishkin (1982) et Milner et Goodale (1995) en proposant que les fonctions «où ?» et «comment ?» seraient deux fonctions distinctes de la voie dorsale, correspondant à deux parties distinctes du cortex pariétal postérieur. La première impliquerait le fonctionnement du lobule pariétal inférieur et serait responsable de processus

nécessaires à la cognition spatiale et aux comportements spatiaux complexes (comme s'orienter dans l'espace). La seconde mettrait l'aire pariétale supérieure à contribution et serait responsable des processus de traitement «en ligne» de l'information visuelle utile à l'action. Au final, on peut sans doute conclure que l'orientation dans l'espace dépend à la fois de la voie dorsale et de la voie ventrale. La première est probablement plus impliquée dans le domaine sensorimoteur, comme par exemple dans le maintien de la posture érigée. La seconde permettrait l'intrusion des processus cognitifs lorsque des jugements conscients d'orientation doivent dominer le comportement général.

L'étude des indices visuels principaux utilisés pour juger de l'orientation de la gravité illustre bien cette coexistence entre les processus sensorimoteurs et cognitifs. Howard et ses collaborateurs en distinguent trois : le cadre de référence visuel, la polarité visuelle et le mouvement de la scène visuelle (Allison et al., 1999 ; Howard et Childerson, 1994 ; Howard et Hu, 2001).

Le cadre de référence visuel se réfère à l'ensemble des lignes horizontales et verticales disponibles dans l'environnement. En conditions normales, ces indices sont fournis par tous les objets typiquement alignés sur la gravité ou parallèles à l'horizon, tels que les murs, les plafonds, les arbres, etc... Ces objets, qui forment le cadre de référence visuel, possèdent la plupart du temps une polarité visuelle, c'est-à-dire un 'haut' et un 'bas' identifiables. On distingue deux types de polarité visuelle, la polarité intrinsèque et la polarité extrinsèque. Un objet a une polarité intrinsèque lorsque sa forme s'organise autour d'un axe avec l'une des extrémités identifiable en temps que 'haut' et l'autre en tant que 'bas'. Un axe de polarité coïncide très souvent avec un axe de symétrie. Un animal, une maison, une voiture ont chacun un plan de symétrie bilatérale avec un 'haut' et un 'bas'. Un arbre ou un dôme présente une symétrie radiale autour d'un axe vertical avec un 'haut' et un 'bas'. La polarité peut être également extrinsèque lorsqu'elle est définie par les relations spatiales entre les objets. Un objet qui repose sur un autre objet, comme une boîte sur une étagère, ou un objet qui pend à un fil possède une polarité extrinsèque. La polarité est sans doute l'indice visuel qui fait le plus appel aux fonctions cognitives. On peut d'ailleurs noter que plusieurs cas d'illusions rencontrées en vol résultent de l'attribution erronée d'une polarité à un ou des objets de l'environnement (§ 1.1). Rappelons, par exemple, le cas où le pilote confond les lumières au sol avec les étoiles lors d'un vol de nuit. Il attribue alors une polarité inversée aux objets et, en conséquence, interprète de façon incorrecte l'orientation de son avion.

Le mouvement de la scène visuelle, le troisième indice d'orientation selon Howard et ses collaborateurs, relève quant à lui majoritairement de processus sensorimoteurs. Les mouvements de plages lumineuses et sombres sur la rétine périphérique provoquent des sensations de mouvement du corps, appelées vections optocinétiques (Dichgans et al., 1972). Par exemple, si les zones claires et sombres tournent par rapport au sujet, il apparaît une sensation de rotation. Si elles se déplacent en ligne droite ou changent de dimension en convergeant ou en divergeant par rapport à un point lointain, elles font naître une sensation de déplacement linéaire. Nous reviendrons sur les phénomènes vectionnels dans la suite de ce chapitre.

2.1.2. Le système vestibulaire

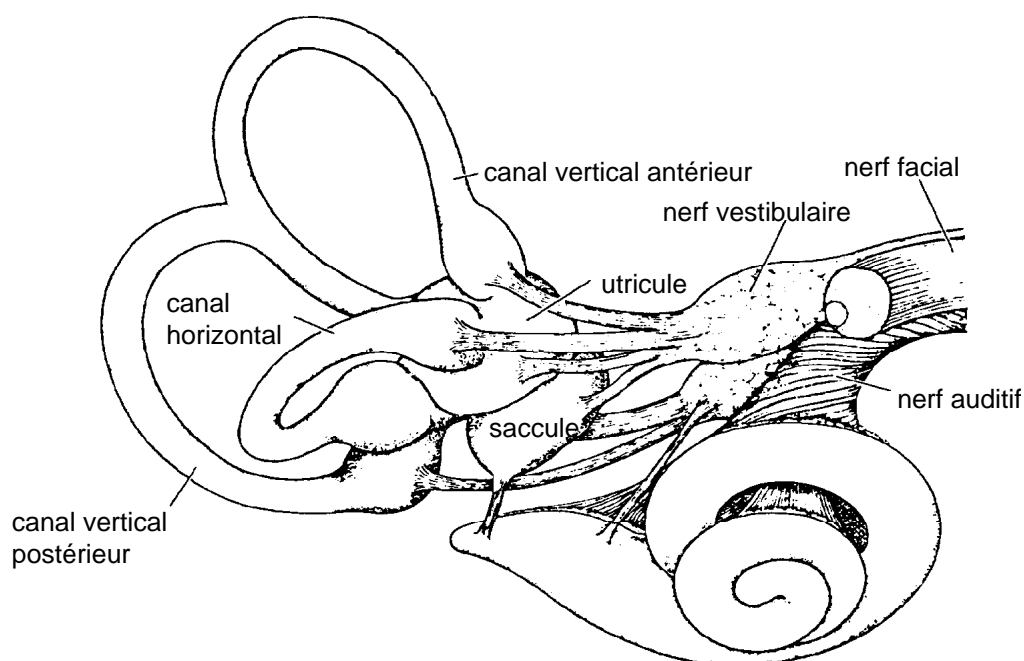


Figure 12 : L'appareil vestibulaire de l'oreille interne, véritable «centrale» inertielle naturelle. D'après Colin et Lienhart (1999).

De chaque côté de la tête, on trouve, encastrés dans l'ossature de l'oreille interne, un ensemble très complexe d'organes sensoriels appelés les labyrinthes (Fig. 12). Chaque labyrinthe comprend la cochlée, organe de l'audition, trois canaux semi-circulaires et deux organes otolithiques, le saccule et l'utricule. Les canaux semi-circulaires et les otolithes sont indépendants des fonctions auditives et constituent l'appareil vestibulaire. Les otolithes sont sensibles aux accélérations linéaires et aux

inclinaisons de la tête par rapport à la verticale, définie par le champ de pesanteur terrestre. Les canaux semi-circulaires, quant à eux, détectent les accélérations angulaires. Le rôle de l'appareil vestibulaire est donc de détecter l'ensemble des mouvements de la tête selon les six degrés de liberté de l'espace (trois en rotations, trois en translation).

2.1.2.1. Les organes otolithiques

Les organes otolithiques prennent la forme de deux «sacs» comprenant chacun une plaque d'épithélium sensoriel, la macula. Ces macules comportent des cellules sensorielles munies de cils dont la pointe s'enchâsse dans une membrane gélatineuse baignant dans un liquide visqueux, l'endolymphe (Fig. 13).

De nombreux cristaux de calcite sont incrustés dans la membrane. Lorsque la tête est inclinée, la membrane glisse le long de la macula. Lorsqu'une accélération linéaire est appliquée dans le plan de la macula, les cristaux, par inertie, se déplacent moins vite. Dans les deux cas, une force de cisaillement s'exerce entre les cristaux et la base, d'où un mouvement des cils qui provoque des décharges nerveuses dans les cellules sensorielles. Ces décharges, conduites par le nerf vestibulaire, renseignent le cerveau sur l'orientation de la tête ou sur l'amplitude de son accélération.

Ce principe de fonctionnement s'applique aux deux organes qui constituent l'appareil otolithique, le saccule et l'utricule. Ceux-ci ne diffèrent que par leur orientation. Lorsque la tête est tenue droite, les macules utriculaires se trouvent dans un plan approximativement horizontal et les macules sacculaires dans un plan vertical. La combinaison des informations émanant de l'ensemble des macules permet au système nerveux central d'être renseigné sur les forces gravitationnelles s'exerçant sur la tête, quelle que soit leur direction.

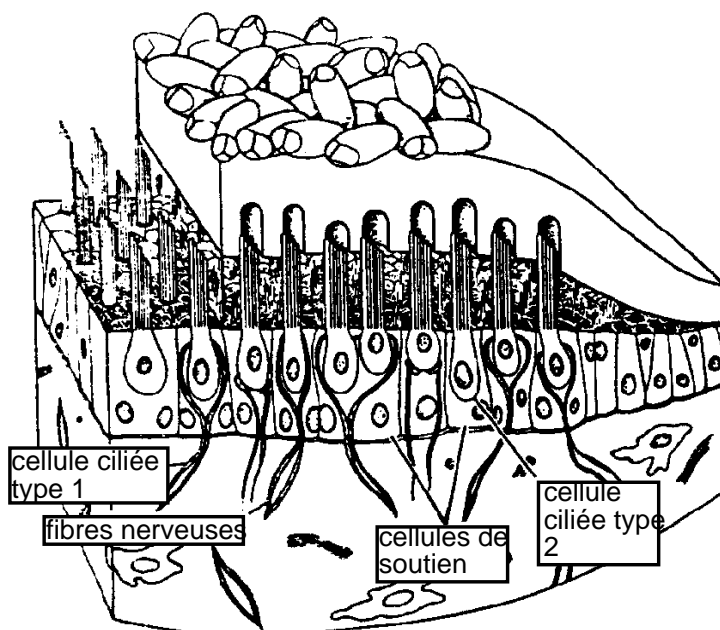


Figure 13 : Les organes otolithiques. Les accélérations linéaires provoquent des déplacements de la membrane supérieure sur laquelle sont fixés des cristaux de calcite. Ces déplacements courbent les corps ciliaires sensitifs, qui génèrent alors un message nerveux dont l'intensité est proportionnelle à l'accélération (au-dessus d'un seuil d'excitation et dans une plage de linéarité donnée). D'après Colin et Lienhart (1999).

Les seuils de détection des accélérations linéaires sont très bas (Colin et Lienhart, 1999). Dans l'obscurité, une accélération de $0,6 \text{ m.s}^{-2}$, soit $0,005 \text{ G}$, peut être perçue dans le plan horizontal. Ce seuil correspond à une durée d'accélération de l'ordre de 5 s . Si l'accélération est plus brève, le seuil d'accélération perceptible, a , est donné par le produit à peu près constant :

$$a \times t = 0,3 \text{ à } 0,4 \text{ m.s}, \text{ où } t \text{ est la durée de l'accélération.}$$

Une accélération de $0,01 \text{ G}$ peut être perçue dans le plan vertical. En ce qui concerne la sensibilité aux changements de position, les organes otolithiques sont capables de détecter une inclinaison de la tête de l'ordre de $1,5^\circ$. Cependant, lorsque les mouvements sont lents, il faut qu'une certaine amplitude soit atteinte pour que l'inclinaison puisse être perçue. Ainsi, Bringoux et al. (2002) montrent que si on bascule lentement ($0,05^\circ.\text{s}^{-1}$) des sujet assis dans l'obscurité, il ne perçoivent un changement de leur orientation que si l'inclinaison atteint, en moyenne, une amplitude de 5° dans le plan frontal (inclinaison latérale) et de 6° dans le plan sagittal (inclinaison antéro-postérieure). Ces seuils de détection, bien qu'élevés, sont encore plus importants

lorsque les informations somatosensorielles sont neutralisées (Bringoux et al., 2000), ce qui suggère à la fois la très faible fiabilité des informations otolithiques lorsqu'elles ne sont pas traitées par des processus dynamiques et le caractère plus informatif des informations somatosensorielles. Cette caractéristique est à l'origine des illusions d'orientation consécutives aux dérives lentes de l'attitude des avions (cf. § 1.2.2).

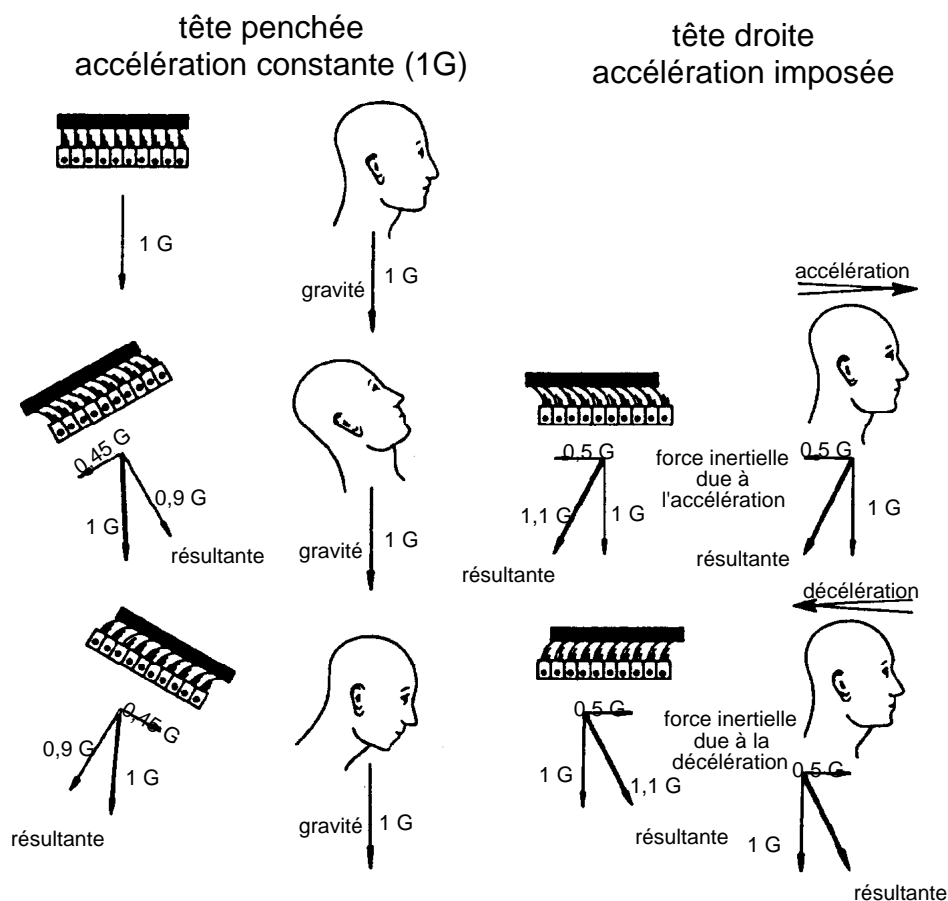


Figure 14 : Stimulations identiques des organes otolithiques par différentes combinaisons d'inclinaisons de la tête et d'accélération linéaires. D'après Benson (1973)

Autre limitation inhérente au fonctionnement des otolithes : d'après le principe d'équivalence d'Einstein, aucun accéléromètre ne peut permettre de faire la différence entre les forces inertielles générées lors d'une accélération linéaire et les forces gravitaires. Les otolithes ne peuvent donc pas permettre à eux seuls de faire la distinction entre une accélération linéaire et une inclinaison de la tête par rapport à la verticale gravitaire. Ce problème de différenciation gravito-inertielle est illustré par la figure 14 et donne lieu aux illusions somatograviques, observées lors du catapultage des avions ou lors de certaines manœuvres (cf. § 1.2.2).

2.1.2.2. Les canaux semi-circulaires

Les trois canaux semi-circulaires, placés sur l'utricule (Fig. 12), sont situés dans des plans presque orthogonaux. Il s'agit du canal vertical postérieur (ou frontal), du canal vertical antérieur (ou sagittal) et du canal horizontal (ou latéral). Bien que les axes des canaux semi-circulaires ne correspondent pas exactement aux axes de référence des mouvements de la tête (Fig. 15), on désigne souvent les canaux d'après ces axes : les canaux horizontaux sont les canaux des mouvements en lacet, les canaux verticaux antérieurs sont les canaux des mouvements en tangage et les canaux verticaux postérieurs sont les canaux des mouvements en roulis.

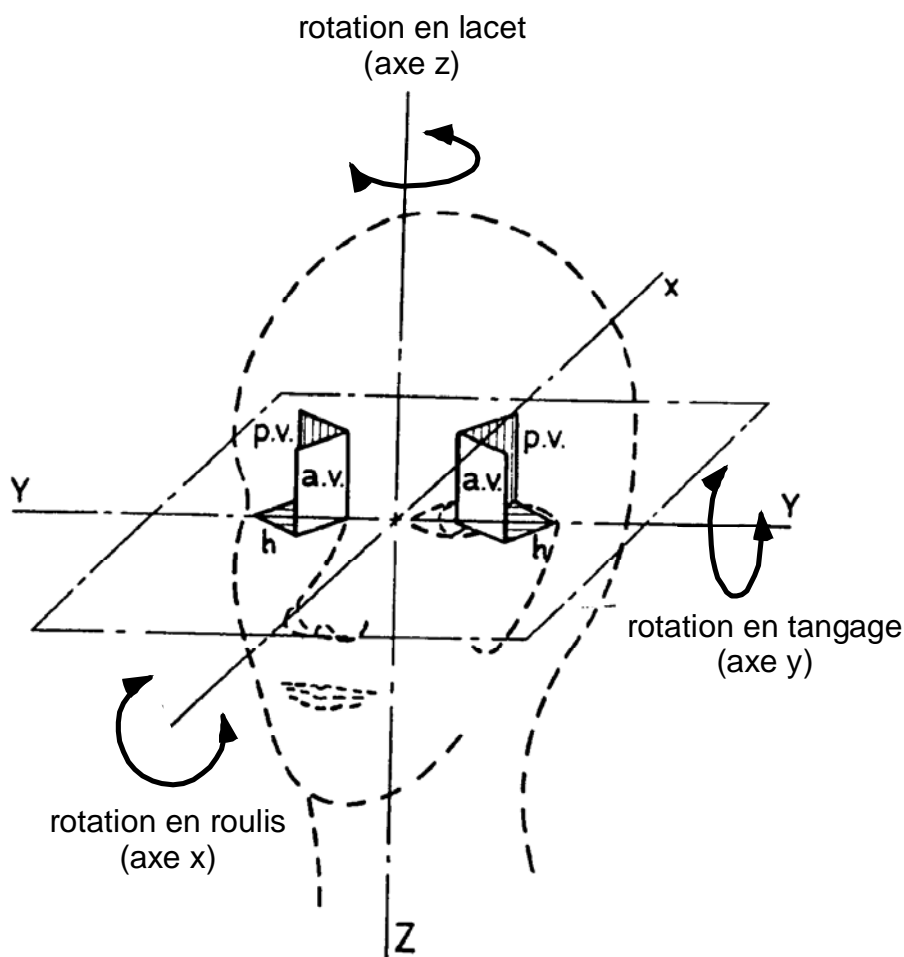


Figure 15 : Orientation des trois plans des canaux semi-circulaires par rapport à la tête. Notons que seuls les plans horizontaux de la tête et des canaux sont coplanaires. Les canaux verticaux sont décalés de 45° environ par rapport aux plans de rotation de la tête en roulis et en tangage. Adapté de Benson (1973).

Chaque canal présente un arc et une ampoule, zone renflée située près de l'utricule et remplie d'endolymphe (Fig. 16). L'ampoule (Fig. 17) contient une formation sensorielle, la crête ampullaire. Cette crête est formée d'une assise de cellules ciliées, ressemblant de très près aux cellules des macules utriculaires et sacculaires, et disposées en dôme. Les cils de ces cellules sont emprisonnés dans la cupule, volet gélatineux qui s'étend de la surface de la crête à la paroi opposée de l'ampoule, obturant complètement la lumière du canal. La cupule est plus mobile en son centre qu'au niveau de ses attaches périphériques avec les parois de l'ampoule. Elle est aussi plus dense que l'endolymphe, d'où une inertie importante du système cupulo-endolymphe, dont le fonctionnement est assimilable à celui d'un pendule sur-amorti.

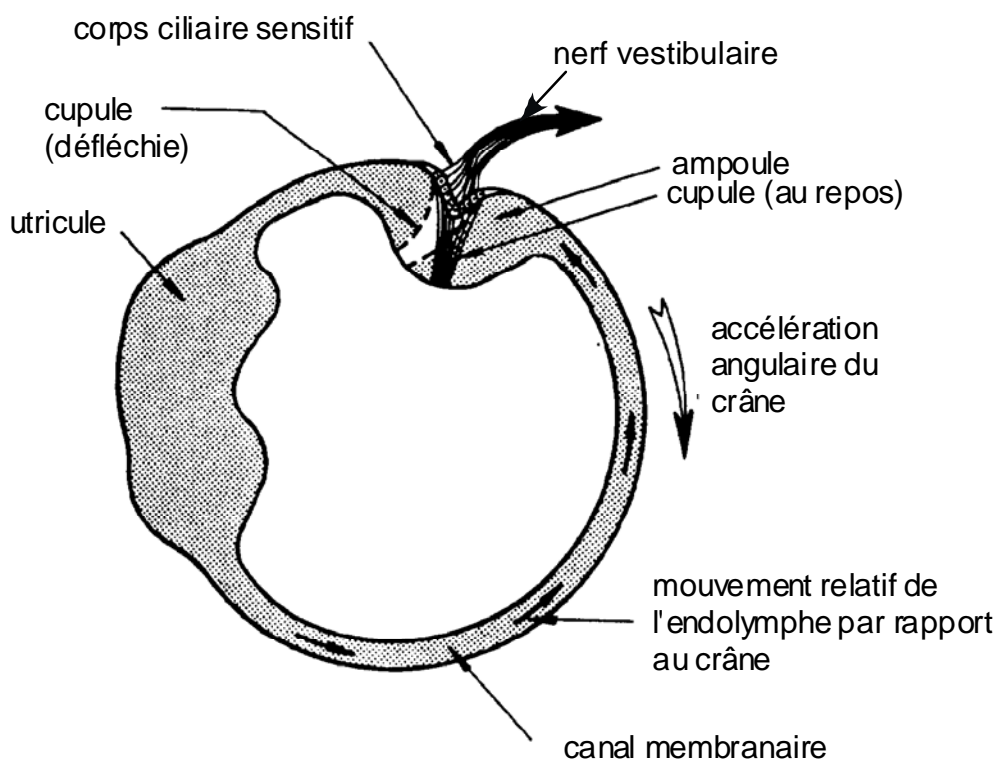


Figure 16 : Schéma d'un canal semi-circulaire. D'après Benson (1973).

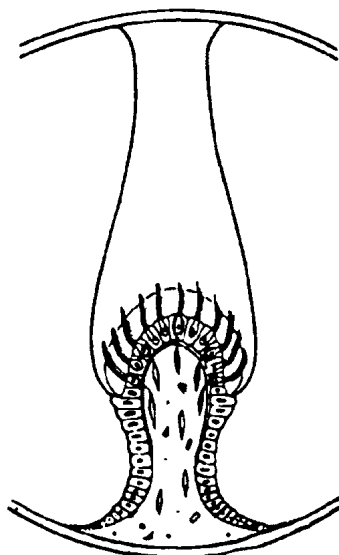


Figure 17 : Schéma de l'ampoule d'un canal montrant les cils emprisonnés dans la cupule. D'après Colin et Lienhart (1999).

La circulation de l'endolymphe résulte des mouvements de rotation de la tête dans le plan de son canal. Au début de la rotation, l'inertie de l'endolymphe l'empêche de se mouvoir aussi vite que le canal qui la contient. Ce phénomène équivaut à un courant d'endolymphe dans le sens inverse du mouvement de la tête. Ainsi, si l'on fait tourner un sujet, tête droite, de la gauche vers la droite, le mouvement de l'endolymphe est ampullopète dans le canal horizontal droit, et ampullofuge dans le canal horizontal gauche. Les canaux semi-circulaires réagissent aux accélérations angulaires de la tête, mais encodent en fait sa vitesse, de par une intégration (au sens mathématique du terme) due aux propriétés mécaniques du système cupule-endolymphe. Cet encodage fonctionne extrêmement bien pour les fréquences moyennes et élevées des mouvements de la tête. En revanche il se dégrade aux basses fréquences ($<0,1$ Hz). De plus, lors des rotations à vitesse constante (Fig. 18), le fluide finit par se déplacer à la même vitesse que le canal. Il faut environ 30 secondes pour que la cupule revienne ainsi à sa position de repos. La sensation de rotation disparaît alors. L'arrêt de la rotation va provoquer un déplacement de la cupule dans le sens inverse à celui du début de la rotation. L'impression subjective sera celle d'une rotation en sens inverse du sens originel. Lorsque l'homme évolue à la surface de la terre, les mouvements de la tête ne comportent que des temps d'accélération et de décélération se succédant sans phase intermédiaire de vitesse angulaire constante. En vol, ces conditions naturelles ne sont pas respectées, ce qui occasionne les illusions somatogyrals (cf. § 1.2.1).

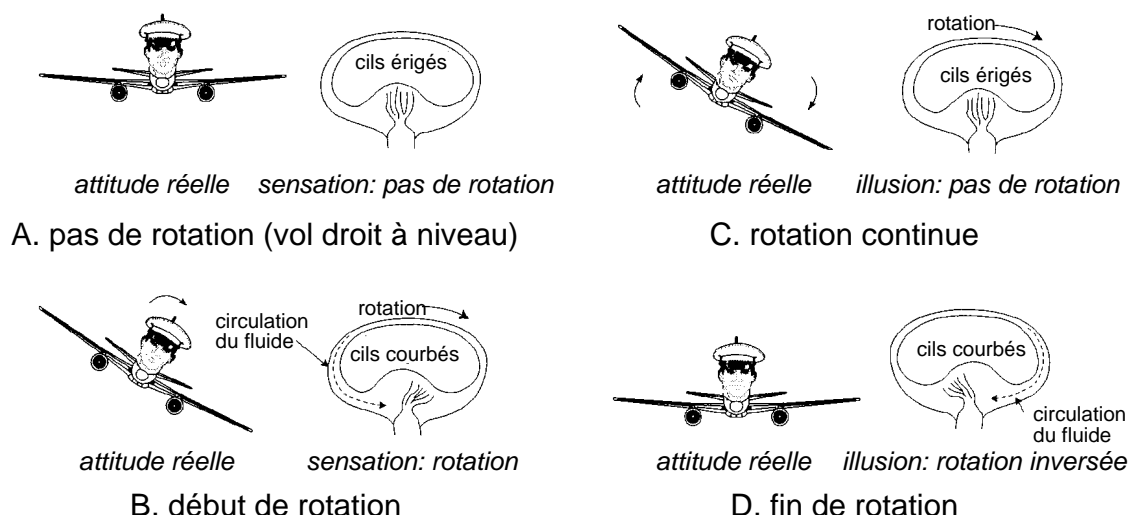


Figure 18 : Quand la tête est droite (par rapport à la gravité), les corps ciliaires sont érigés et indiquent au cerveau qu'aucune rotation n'a lieu (A). Lorsque la tête tourne sur au moins un axe, l'inertie fait circuler le fluide dans le canal, en retard sur le mouvement de la tête. Ce mouvement relatif courbe les cils et produit le message nerveux (B). Si la vitesse de rotation se maintient constante (ou inférieure au seuil de $1^\circ/\text{s}^2$), le fluide rattrape le canal, la stimulation cesse, ainsi que la sensation de rotation (C). Lorsque la rotation cesse, le liquide circule à nouveau, pendant quelques secondes, mais en sens inverse, produisant une sensation de contre-rotation (D).

Le fonctionnement des canaux semi-circulaires en fait des détecteurs d'accélération angulaire. La réponse à une rotation est maximale pour un canal lorsque celui-ci est situé dans le plan de la rotation. Les canaux horizontaux sont les plus sensibles et peuvent détecter une accélération de $0,14^\circ.\text{s}^{-2}$. Pour les autres canaux, le seuil moyen est de $0,5^\circ.\text{s}^{-2}$. Les seuils de perception d'une accélération angulaire dépendent non seulement de la valeur de cette accélération, mais aussi de sa durée. En effet, pour qu'une accélération angulaire soit perçue, il faut que le produit de son intensité par sa durée soit égal ou supérieur à $2,5^\circ.\text{s}^{-1}$. Cette loi, dite de Mulder, valable pour les rotations d'une durée inférieure à 5 s, montre qu'une accélération de $5^\circ.\text{s}^{-2}$ ayant une durée de 0,5 s est perçue, mais qu'une accélération de $10^\circ.\text{s}^{-2}$ ayant une durée de 0,1 s n'est pas perçue. Autre conséquence de cette loi : il existe un temps de latence de la perception, fonction de l'intensité de l'accélération angulaire.

2.1.3. *La somesthésie*

Les récepteurs vestibulaires ne sont pas les seuls récepteurs sensibles aux variations gravito-inertiels. Des gravicepteurs présents au niveau abdominal et certaines afférences en provenance des reins et du système vasculaire jouent un rôle dans la détection d'accélération, de rotations à vitesse constante et dans l'estimation de l'orientation du corps lors d'inclinaisons du sujet (Mittelstaedt, 1995a, 1995b, 1998). Ces récepteurs font partie de l'ensemble complexe désigné sous le terme de somesthésie. Dans son sens le plus large, la somesthésie peut être définie comme l'information sensorielle issue du corps. On parle également de kinesthésie pour désigner l'ensemble des informations renseignant sur le mouvement des segments corporels les uns par rapport aux autres. Les récepteurs vestibulaires, dans la mesure où ils renseignent sur l'attitude de la tête, sont considérés par certains comme faisant partie de la kinesthésie. Cependant, cette fonction sensorielle est également assurée en grande partie par les récepteurs musculaires, cutanés et tendineux, qui contribuent à la proprioception, cet autre sens longtemps resté inconnu et découvert par Sherrington (1893).

Les fuseaux neuro-musculaires, tout d'abord, sont des unités à la fois motrices et sensorielles, incluses dans tous les muscles du corps, qui renseignent sur la longueur d'étirement des muscles. Les organes tendineux de Golgi, logés au sein des insertions tendineuses des muscles, ainsi que divers récepteurs articulaires renseignent également sur la position des différents segments corporels. L'information fournie par ces récepteurs joue un rôle crucial dans la régulation du tonus musculaire en général et dans le maintien de la position érigée en particulier. En vol, la résultante des forces d'inertie et de pesanteur, en augmentant ou en diminuant l'étirement des muscles, en particulier des muscles extenseurs du cou, de la tête, du tronc et des membres, provoque des modifications des contractions réflexes destinées à maintenir le corps dans des relations spatiales normales avec la verticale. Les récepteurs proprioceptifs cutanés jouent également un rôle non-négligeable dans la perception de l'orientation, dans la mesure où la force de pesanteur fait naître des sensations de pression et de contact dont la distribution nous renseigne sur la position du corps par rapport à la verticale gravitaire. La combinaison des forces d'inertie et de pesanteur, en modifiant la distribution normale des pressions, modifie donc aussi les renseignements émanant des récepteurs cutanés.

L'information kinesthésique, en particulier proprioceptive, alimenterait un modèle global de la configuration des segments corporels, élaboré par le système

nerveux central, désigné sous le terme de schéma corporel (Head et Holmes, 1911-1912). Plus qu'une association d'indices kinesthésiques, le schéma corporel serait une référence par rapport à laquelle ces indices seraient synthétisés sur la base de modèles internes des propriétés du corps. Selon Gurfinkel et Levick (1991), le schéma corporel aurait une composante perceptive (l'image du corps), base de la conscience du corps, et une composante automatique (le schéma corporel postural), agissant par le biais de processus sensori-moteurs pour le contrôle de la posture et des mouvements corporels. Graziano et al. (2000) proposent des arguments neurophysiologiques convaincants qui situent les fonctions du schéma corporel dans le cortex pariétal postérieur (voir également Flor et al., 2000). C'est pourquoi il est proposé que le schéma corporel est impliqué dans la mise en relation de l'espace du corps avec l'espace extracorporel où les mouvements orientés sont produits (Gurfinkel et al, 1993 ; Mars et al., 1998 ; Richard et al., 2000).

2.2. Les facteurs de l'intégration sensorielle

Nous avons jusqu'ici parcouru les différents systèmes perceptifs impliqués dans l'orientation spatiale. Bien entendu, chaque système ne fonctionne pas pour lui-même et isolément des autres. L'expérience que nous faisons du monde qui nous entoure n'est pas fragmentée. Le monde nous apparaît comme stable et formant un tout grâce aux processus d'intégration multisensorielle mis en jeux par le système nerveux central. Cette intégration se fait grâce la mise en relation des diverses informations sensorielles, malgré leurs natures différentes, dans des cadres de référence de plus en plus généraux.

2.2.1. Plurimodalité de la perception : redondance, complémentarité et gestion des conflits

Les différentes modalités sensorielles apportent de l'information spatiale, chacune avec leurs caractéristiques et leur limites. Il est probable que, dans des conditions favorables, une certaine redondance existe dans l'information fournie par l'ensemble des systèmes sensoriels. Cette redondance est probablement utilisée pour réduire les imprécisions de chacun des systèmes pris isolément. Cependant, il apparaît que les systèmes sensoriels sont complémentaires, plus que redondants. Autrement dit, les limites d'une modalité sensorielle peuvent être dépassées grâce à sa coopération

avec les autres modalités. L'interaction étroite entre le système visuel et le système vestibulaire est par exemple très bien documentée.

Considérons par exemple l'incapacité des organes otolithiques à faire la distinction entre une accélération linéaire et une inclinaison de la tête (cf §2.1.2.1). Comment alors faire la différence entre «je bouge vers l'avant» et «je suis penché vers l'arrière» ? Une représentation correcte de la relation corps/environnement ne peut pas être établie exclusivement sur la base des informations otolithiques. Le caractère plurimodal de la perception pallie à ce problème. La vision, intervenant dans un registre différent, permet de référer la position du corps par rapport aux repères stables du monde physique externe, notamment verticaux et horizontaux. Elle contribue de façon conséquente à la perception du mouvement, d'une part par le biais de la vision périphérique qui procure une information «proprioceptive» sur la vitesse et la direction du déplacement (notion de flux optique) et d'autre part, en dispensant des informations extéroceptives sur la structure de l'environnement (vision centrale). Selon Tokumaru et al. (1998), c'est cette dernière information qui va permettre au système nerveux central de distinguer une accélération linéaire d'une inclinaison du sujet en arrière.

A l'opposé, si la vision détecte les mouvements relatifs de l'environnement visuel sur la rétine, elle ne s'appuie sur aucune référence fixe dans l'environnement (à l'inverse des otolithes qui utilisent la gravité) et ne permet pas de discerner s'il s'agit d'un mouvement du sujet ou bien de l'environnement. L'étude des phénomènes devection (illusion de mouvement propre du corps induite par un déplacement de la scène visuelle) illustre cet aspect «lacunaire» du système visuel. On trouve là l'explication de l'illusion bien connue du train en gare : lorsque le train voisin de celui dans lequel vous vous trouvez démarre, vous pouvez interpréter l'information visuelle comme étant la conséquence du départ de votre propre train. Pourtant, lorsque le flux visuel crée par le départ du train voisin stimule notre rétine périphérique, aucun influx vestibulaire n'est généré, ce qui devrait nous conduire à interpréter le flux comme résultant bien d'un mouvement dans l'environnement. L'explication tient dans le fait que les détecteurs de mouvements vestibulaires et visuels travaillent dans des gammes de sensibilité différentes. Le vestibule est plutôt plus sensible aux hautes vitesses, la vision (en particulier périphérique) plus sensible aux basses vitesses. De nos jours, le démarrage d'un train est suffisamment «souple» pour que les informations vestibulaires et tactiles soient inopérantes. L'information visuelle périphérique (très sensible au mouvement et dont la plage préférentielle de fonctionnement se situe dans le spectre des basses

fréquences) a donc un poids énorme dans une telle situation. Le système nerveux central «prend une décision» pour résoudre l'ambiguïté, décision correspondant à la situation la plus communément rencontrée de façon naturelle : notre corps a plus de facilité à se déplacer par rapport à l'environnement que le contraire. Ce n'est que lorsque l'individu dispose de plus d'informations (référentiel externe accessible, incompatibilité entre la fréquence du stimulus visuel et l'absence de stimulation vestibulaire...) ou bien qu'il analyse la situation (ce n'est pas encore l'heure de départ de son train, il possède une expérience antérieure de la situation, il constate qu'un passager monte dans le train...) qu'il prend conscience de son erreur.

L'exemple du train démontre bien que ce qui est nécessaire n'est pas toujours suffisant. Pourtant, dans des conditions normales, les modalités visuelles et vestibulaires sont sans conteste complémentaires. La vision informe l'organisme sur la direction et la vitesse des mouvements de la tête à vitesse constante, améliorant par conséquent la fonction tachymétrique du système vestibulaire, et les organes labyrinthiques permettant de distinguer les mouvements du corps propre de ceux de l'environnement. Cette complémentarité s'étend aux bandes passantes respectives des deux systèmes, la vision étant prépondérante aux basses fréquences et le système vestibulaire aux fréquences élevées. Sur le plan fonctionnel, les relations visuo-vestibulaires sont très étroites, les deux systèmes coopérant dans la plupart des situations. Cette coopération s'appuie sur la convergence des afférences vestibulaires et visuelles vers des structures nerveuses communes telles que les noyaux vestibulaires et le cervelet (Lacour et Borel, 1993). Ainsi, l'intégration des informations visuelles et vestibulaires permet à tout instant au système nerveux central de reconstruire, en théorie, l'orientation de la tête dans l'espace.

Disposant de récepteurs aux caractéristiques diverses et souvent complémentaires, le système nerveux central va pouvoir intégrer toutes les informations recueillies et élaborer une représentation «cohérente» de la relation corps/environnement. Il est toutefois possible que la situation prive l'organisme de certaines entrées ou bien génère des informations conflictuelles. Le système nerveux central, face à une configuration inhabituelle d'informations, doit alors résoudre l'ambiguïté qui en découle. Merfeld et al. (1999) proposent que des modèles internes puissent servir à lever certaines de ces ambiguïtés. La notion de modèle interne fait référence à la capacité qu'a le système nerveux central de simuler des principes physiques de l'environnement. Merfeld et al. (1999) s'intéressent en particulier au problème posé par la confusion faite par les gravicepteurs, en particulier les otolithes,

entre gravité et accélération linéaire. Ils soumettent des sujets à des combinaisons d'inclinaisons corporelles et de rotations continues pour créer des stimulations gravito-inertielles ambiguës et observent que les réflexes vestibulo-oculaires générés à l'arrêt de la rotation témoignent d'une estimation faite par le système nerveux central de la direction de la gravité, à l'aide d'indices fournis par les canaux semi-circulaires. Cette estimation se ferait sur la base d'un modèle interne des relations entre l'accélération gravitaire et les accélérations provoquées par le mouvement, ce qui permettrait d'interpréter les configurations d'informations ambiguës. Les auteurs suggèrent également que de tels modèles internes sont des processus généraux utilisés pour synthétiser l'information issue de capteurs disparates et pour combiner l'information afférente et l'information efférente. En effet, la capacité de simulation que représente un modèle interne permet l'anticipation, c'est-à-dire pouvoir prédire les conséquences d'une action ou d'un mouvement en cours. Ces modèles internes s'élaboreraient au fil de l'expérience perceptive et moduleraient en retour le traitement de l'information spatiale.

2.2.2. Espaces et référentiels spatiaux

Comme nous l'avons suggéré plus haut, c'est l'intégration centrale des différentes sources d'informations sensorielles qui permet d'aboutir à une représentation de la relation corps/environnement. Cette notion de relation corps/environnement fait appel à la notion de référentiel où sont repérés les mouvements, puisque l'organisme vivant doit pouvoir distinguer, en cas de déplacement, qui de l'environnement ou de lui-même est en mouvement. Pour effectuer cette distinction, il est indispensable d'une part, d'être informé de ses propres modifications de position et d'orientation, d'autre part de référer ces dernières à des invariants spatiaux présents dans l'environnement. La notion de relation corps/environnement est également inséparable de la notion d'espace. Nous avons tous la conviction qu'un espace constant, invariant, unifié nous entoure. Il s'agit là pourtant d'une élaboration cognitive qui cache une réalité neurologique bien différente. Nous allons voir, en effet, qu'il est plus juste de parler d'espaces, au pluriel, que d'un espace unique.

L'étude des référentiels spatiaux a pour objectif de déterminer quels sont les repères fondamentaux par rapport auxquels les informations spatiales sont appréciées. Par exemple, il est possible de représenter la place des objets dans l'espace de plusieurs façons. Supposons que vous souhaitiez décrire les relations entre deux objets dans une

pièce. Une façon de coder ces relations consiste à tout rapporter à vous-même, à estimer la distance et l'angle de chacun des objets par rapport à votre corps. Les informations relatives aux objets sont alors appréhendées dans un référentiel dit égo-centré. Dans la vie courante, un grand nombre de situations impliquent une perception précise de la position et des mouvements des objets par rapport au corps. Pour Jeannerod et Biguer (1989), cette «référence au corps propre constitue une des bases de l'organisation du comportement orienté vers l'espace extra-corporel». Ils proposent que la représentation interne du plan sagittal médian servirait de référence par rapport auquel serait évaluée la position des objets. Cependant, de nombreux arguments plaident en faveur de référentiels égo-centrés multiples, centrés sur différentes parties du corps (le tronc, la tête, l'épaule, la main) et mis en jeu lors de tâches différentes (Heuer et Sangals, 1998 ; McIntyre et al., 1997 ; Soechting et Flanders, 1992 ; Soechting et al., 1990). Par exemple, Carrozzo et al. (1999), proposent que les coordonnées spatiales d'une cible visuelle est d'abord représentée dans un référentiel centré sur la tête avant d'être transposée dans des référentiels centrés sur le corps, puis sur le bras, lorsqu'un mouvement d'atteinte doit être dirigée vers elle.

L'idée plus ou moins explicite que ces référentiels sont «emboîtés» ou hiérarchisés est souvent mise en avant dans les conceptions actuelles. Un modèle de l'orientation spatiale proposé par Mergner donne une illustration de ce courant d'idée. Mergner et al. (1991) proposent en effet un modèle décrivant la façon dont les informations fournies par le système vestibulaire à propos des mouvements de la tête sont combinées avec la proprioception nucale pour référer la tête au tronc. Cette interaction vestibulo-proprioceptive ne serait qu'une fraction d'un mécanisme complexe de transformation de coordonnées, qui lierait les différents segments corporels entre eux (Fig. 19). Par le biais de flux d'informations à la fois ascendants et descendants, la position et l'orientation de la tête dans l'espace seraient fonctionnellement liées avec les forces de réaction entre le corps et les surfaces sur lesquelles il s'appuie (Mergner et al., 1998). De cette façon, l'information sensorielle provenant d'une partie du corps peut être utilisée pour des tâches perceptives ou motrices dont le capteur ou l'effecteur réside sur une autre partie du corps (Mergner et al., 1997).

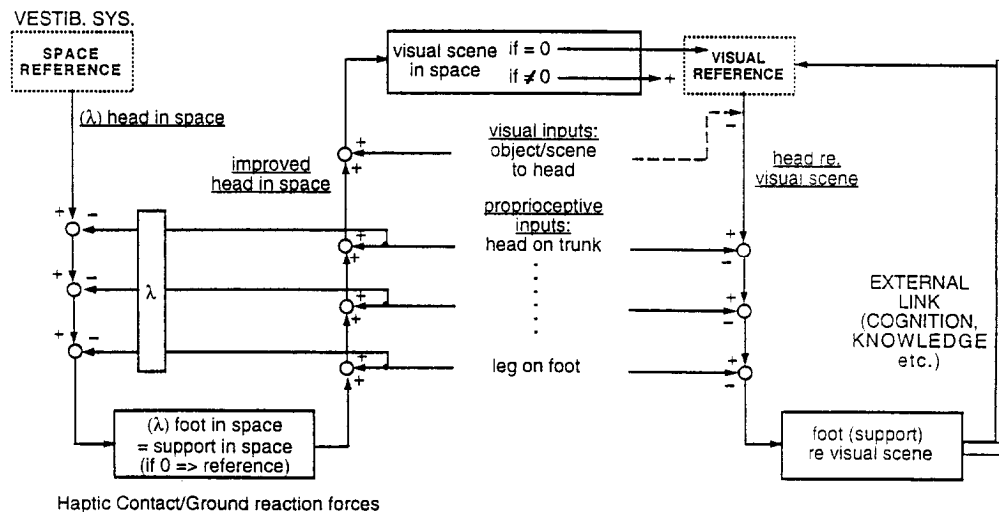


Fig 19 : Le modèle de Thomas Mergner, comme exemple d'une conception hiérarchique des référentiels spatiaux. L'orientation absolue de la tête dans l'espace, mise à jour à partir des informations vestibulaires, est mise en relation avec la représentation de l'orientation de la surface d'appui, par l'intermédiaire d'une chaîne de transformation de coordonnées. Extrait de Mergner et Rosemeier (1998).

Une autre façon de représenter des positions dans l'espace consiste à utiliser les relations des objets entre eux ou à les rapporter à une référence extérieure au corps. Par exemple, les positions de deux objets en mouvement peuvent être évaluées à plusieurs instants successifs par rapport à un troisième objet fixe dans l'espace. Cette fois, aucune référence au corps propre n'est faite et le repère fondamental est décentré dans l'espace extérieur : le référentiel mis en jeu est dit exocentré ou allocentré. Le système nerveux central dispose également d'un élément fondamental de l'environnement terrestre, la gravité. Cette force omniprésente a une caractéristique très importante : elle est constante en direction et en amplitude par rapport à la surface de la terre. C'est donc un invariant de l'espace terrestre. En cela, elle constitue une référence extérieure au corps, une sorte de «fil à plomb» externe auquel les mouvements du corps peuvent être référés dans un référentiel dit gravitaire. Ce référentiel spatial sous-tend la perception de l'orientation du corps par rapport à la verticale ou, chez le pilote, la perception de l'orientation de son avion par rapport à la surface terrestre. D'après Paillard (1991), la contrainte gravitaire fournirait la clé pour effectuer toute transformation d'un référentiel spatial à un autre. La perception correcte de la verticale gravitaire joue donc un rôle primordial dans l'établissement et le maintien de nos relations avec l'environnement.

Les différents référentiels spatiaux utilisés par le système nerveux central pour intégrer l'information des systèmes sensoriels peuvent également être décrits comme les éléments d'une partition de l'espace en sous-espaces fonctionnels. Les modèles de ce

type présentent en général trois régions distinctes de l'espace : l'espace personnel, c'est-à-dire l'espace occupé par le corps propre, l'espace péri-personnel, c'est-à-dire l'espace directement atteignable par un mouvement de saisie manuelle, et, au-delà, l'espace extra-personnel, lui-même parfois dissocié en espace proche et espace lointain (Grüsser, 1983 ; Rizzolatti et Camarda, 1987 ; Stein, 1992). L'étude de patients cérébrolésés permet effectivement de mettre en évidence que le système nerveux central traite l'information spatiale différemment selon la partie de l'espace vers laquelle il agit ou projette d'agir (Vaishnavi et al., 2001 ; Weiss et al., 2000). Chacun de ces sous-espaces se distingue des autres par la gamme des comportements qui s'y déroulent ou qui s'y anticipent. Les actions s'exécutent ainsi en impliquant des mécanismes différents et en mettant en jeu des référentiels distincts, suivant la nature de la tâche réalisée.

La tentative la plus aboutie dans le domaine est sans conteste celle de Previc (1998), car elle constitue une synthèse d'envergure d'un grand nombre d'observations faites sur le sujet sain, le sujet cérébrolésé et l'animal. La force du modèle est de décrire l'importance relative de différents systèmes sensoriels, moteurs et attentionnels, dans chacun des domaines de l'espace tridimensionnel, mais également de proposer plusieurs circuits neuroanatomiques correspondants. Le modèle distingue quatre systèmes cérébraux principaux qui interviennent dans quatre sous-espaces (Fig. 20). Le système cortical dorsolatéral inclut principalement le lobe inférieur du cortex pariétal postérieur, la voie visuelle dorsale qui projette vers ce dernier, l'aire 6 du cortex frontal dorsolatéral, ainsi que le cervelet et le putamen. Il sous-tend les interactions avec l'espace péri-personnel, c'est-à-dire les mouvements d'atteinte et la manipulation des objets qui se font dans un référentiel centré sur le tronc. Un système cortical ventrolatéral comprend la voie visuelle ventrale avec ses projections sur le lobe temporal inférieur, une région du cortex préfrontal, auxquelles s'ajoutent un élément de la voie dorsale, l'aire latérale intrapariétale (LIP), et plusieurs structures sous-corticales moins bien identifiées. Ce système intervient dans l'espace extra-personnel focal, un espace délimité par la vision centrale (et, par conséquent, qui analyse l'information spatiale dans un référentiel rétino-centré) dans lequel les objets sont analysés pour être reconnus. Le troisième système cortical, ventromédian cette fois, partage plusieurs structures avec le système ventrolatéral, mais reçoit des afférences d'un nombre plus important de modalités sensorielles (visuelle, auditive et olfactive) ainsi que des commandes motrices provenant essentiellement des yeux et de la tête. Il entre en jeu dans l'espace extra-personnel d'action, entourant le corps au-delà de la portée des

maines. C'est l'espace de la navigation et de la localisation des objets par rapport aux repères topographiques. Le traitement des informations spatiales dans un référentiel céphalocentré a une place primordiale dans ce système. Enfin, Previc (1998) propose un quatrième et dernier système, moins corticalisé, qui inclut le thalamus ventropostérieur, le cervelet vestibulaire, les noyaux vestibulaires et probablement le putamen. La composante corticale comprend une portion du lobe pariétal supérieur et le cortex rétroinsulaire dans le voisinage de la jonction pariétotemporale. Ce système assure l'orientation et la locomotion dans l'espace extra-personnel ambiant qui repose sur un référentiel gravitaire.

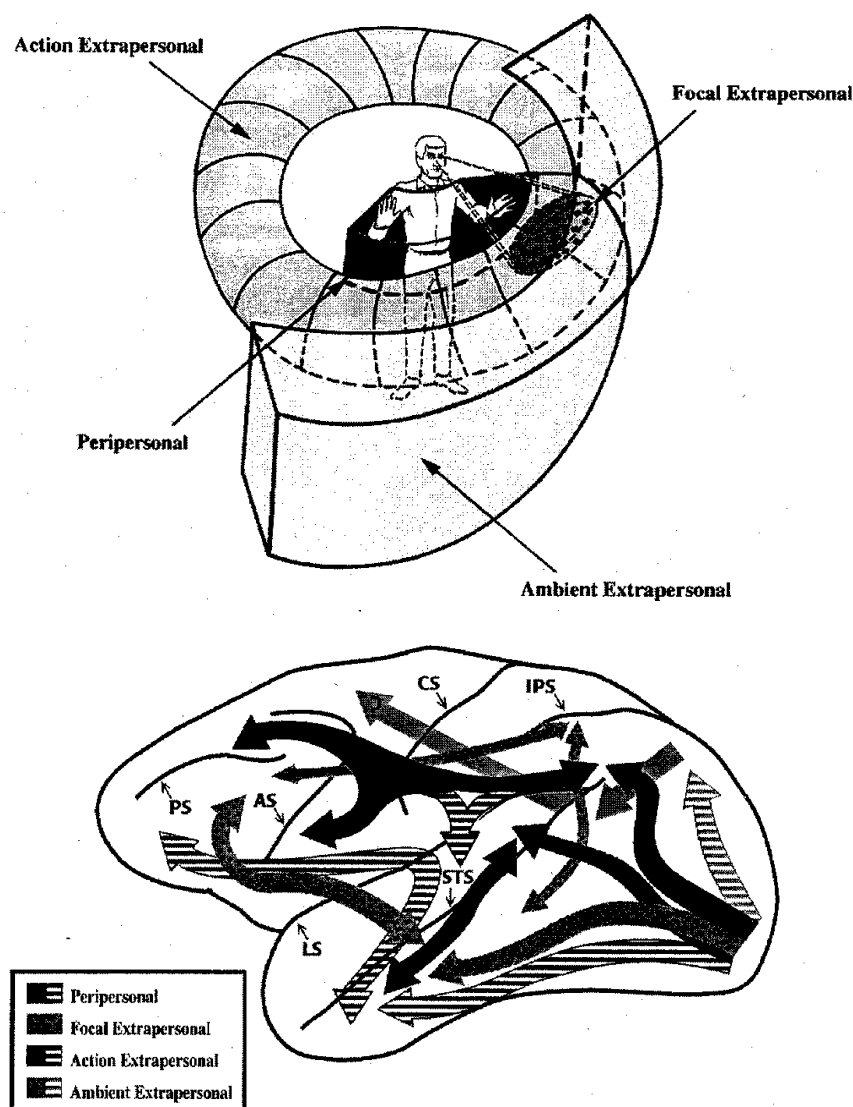


Fig. 20 : La neuropsychologie de l'espace 3D d'après Previc (1998). Les quatre espaces comportementaux sont montrés sur le schéma du haut et les quatre systèmes corticaux correspondants sont sur la partie inférieure.

Le modèle de Previc (1998), au-delà de l'intérêt qu'il présente pour la compréhension fondamentale des mécanismes spatiaux, permet à l'auteur de suggérer plusieurs améliorations au poste de pilotage des aéronefs (Previc, 2000). Par exemple, l'espace péri-personnel étant normalement dédié à la manipulation des objets, Previc suggère d'y transférer tous les interrupteurs actuellement placés ailleurs (sur les côtés ou au-dessus du pilote) et surtout de favoriser l'action sur les afficheurs qui s'y trouvent par le biais de systèmes manuels analogiques (comme un bouton-curseur placé sur le manche de direction). Autre exemple : l'espace d'action extra-personnel étant l'espace des repérages topographiques, une façon d'assurer une bonne compatibilité entre le fonctionnement naturel du système nerveux et les informations données au pilote dans cette partie de l'espace serait d'y inclure des afficheurs renseignant sur la trajectoire empruntée. Une autre suggestion est relative à l'espace extra-personnel ambiant. Selon Previc (2000), les membres inférieurs sont habituellement sollicités pour la locomotion et le maintien de l'équilibre dans cet espace. Il propose donc de transférer une partie du contrôle de l'attitude de l'avion (essentiellement en roulis) à un jeu de pédales. Ces propositions, faites par Previc (2000), illustrent l'avantage potentiel de prendre en compte les propriétés des systèmes cérébraux impliqués dans la perception de l'espace pour la conception de l'environnement des pilotes.

2.2.3. *Le cortex pariétal*

Il est maintenant admis que le cortex pariétal est un carrefour essentiel dans le traitement de l'information spatiale et, en particulier, dans la construction des référentiels spatiaux. Ces dix dernières années ont connu une avancée rapide, quoique encore largement incomplète, de la compréhension du fonctionnement de cette structure clé. Les travaux en question sont venus apporter des arguments forts pour appuyer l'existence de référentiels spatiaux variés, conçus comme des étapes intermédiaires entre la perception et l'action, permettant de synthétiser l'information multisensorielle dans des cadres d'analyse communs.

Les travaux d'Andersen et collaborateurs sont remarquables à cet égard. Ils montrent tout d'abord que certaines cellules des aires 7a et LIP du cortex pariétal postérieur reçoivent la convergence des informations rétiniennes et des signaux de position des yeux pour coder l'information visuelle dans un référentiel céphalocentré (Andersen et Mountcastle, 1983, Andersen et al., 1985). On aurait pu imaginer ces cellules possédant un champ réceptif, c'est-à-dire ne répondant que pour un point donné

de l'espace relatif à la tête, tout comme il existe des champs réceptifs rétinotopiques dans d'autres structures du système nerveux central. Si tel était le cas, la partie de la rétine dont l'information est analysée changerait à chaque mouvement de l'œil pour traiter d'une position de l'espace fixe par rapport à la tête (le champ réceptif céphalocentré de la cellule). En fait, il apparaît que le codage en coordonnées céphalocentrées se fait sous un tout autre format. Plutôt que des champs réceptifs, les signaux visuels et les signaux de position des yeux interagissent pour former des «champs de gain» («gain fields»), dans lesquels l'amplitude de la réponse au stimulus visuel est modulée linéairement en fonction de la position verticale et horizontale de l'œil. De cette façon, la localisation des objets dans le référentiel de la tête n'est pas représentée explicitement au niveau de la cellule unitaire, mais est au contraire distribuée sur un ensemble de cellule de l'aire 7a. La théorie des «champs de gain» est validée par une modélisation effectuée par Zipser et Andersen (1988) qui montre que des réseaux neuronaux entraînés à transformer des signaux rétiniens en coordonnées céphalocentrées par le biais des signaux de position des yeux développent spontanément des couches cachées intermédiaires qui manifestent des «champs de gain». Par la suite, il est montré que ces mécanismes s'appliquent également à la transformation de coordonnées dans un référentiel centré sur le tronc, essentiellement sur la base des informations vestibulaires et proprioceptives nucales (Brotchie et al., 1995), et même à la construction de référentiels centrés sur des éléments de l'environnement extérieurs (Snyder et al., 1998). Les travaux menés sur l'aire intrapariétale ventrale (VIP) montrent également l'existence de traitements effectués dans le référentiel céphalocentré, mais mettent surtout en exergue le rôle d'intégration multisensorielle du cortex pariétal (Bremmer et al., 2001). Duhamel et al. (1998), par exemple, décrivent une population de cellules répondant à la fois à des stimulations tactiles de la tête d'un singe et à des mouvements d'objets visuels se déplaçant dans la direction de ce champ réceptif tactile. L'intégration de signaux visuels et auditifs est également présente dans LIP (Mazzoni et al., 1996).

Certaines questions restent ouvertes quant au format des référentiels construits par le système nerveux central. La théorie des «champs de gain» laisse supposer que les référentiels doivent être envisagés comme des propriétés émergentes de l'activité distribuée de réseaux de neurones. Ce type de codage possède plusieurs avantages. Tout d'abord, une lésion cérébrale n'entraîne qu'une atteinte partielle de la fonction. De plus, cette représentation est plus facile à implémenter. Enfin, les informations rétinienne et

les informations de position de l'œil ne sont pas perdues lors de la transformation de coordonnées. Cependant, des représentations plus explicites des coordonnées spatiales restent envisageables. En effet, Thier et Andersen (1996) mettent en évidence dans une autre aire du cortex pariétal une représentation de coordonnées visuelles céphalocentrées, au niveau de sites localisés de cellules. Cette représentation serait dérivée de la représentation distribuée décrite précédemment. La question se pose alors de savoir pourquoi le système nerveux central implémenterait une seconde représentation du même espace, en théorie moins efficace. Une réponse possible est suggérée par le fait que la stimulation de ces sites nerveux induit, en combinaison avec les mouvements des yeux, des mouvements d'autres segments corporels tels que la tête, les épaules ou le bras. Cette aire corticale pourrait donc être impliquée dans les premières étapes de mouvements coordonnés complexes impliquant le corps entier. L'utilisation d'une représentation céphalocentrée explicite permettrait peut-être alors de réduire la taille et la complexité des réseaux chargés de l'exécution de tels mouvements. D'autres questions restent en suspend. Existe-t'il une hiérarchie des référentiels extra-rétiniens, les uns étant construits à partir des autres, ou sont-ils évoqués séparément en fonction du contexte ? Quelle est la place et la fonction des référentiels «hybrides» (centrés entre deux segments corporels ; cf. Carrozzo et Lacquaniti, 1994 ; Stricanne et al., 1996) ?

2.3. La verticale subjective : indicateur privilégié de l'orientation perçue de la gravité

Un des exemples les plus clairs du caractère multisensoriel de la perception de l'orientation dans l'espace est celui de la verticale subjective, c'est-à-dire la perception que l'on a de la direction de la verticale gravitaire. La verticale subjective est influencée par de nombreuses informations sensorielles issues de chacun des systèmes que nous avons parcourus. La direction de la gravité est perçue directement grâce aux organes otolithiques spécialisés dans cette fonction. Sur terre, les informations fournies par la plante des pieds renseignent sur la distribution du poids du corps entre les deux jambes et permettent ainsi d'évaluer l'orientation du corps par rapport à la station debout alignée sur la gravité. En vol, la distribution des forces de contact entre la surface du corps et le siège du pilote joue un rôle similaire. La vision fournit à la fois des références statiques par rapport auxquelles la verticale subjective peut être étalonnée et

des informations dynamiques de mouvements utilisées pour estimer l'orientation perçue du corps. Chacun d'entre nous peut donc, dans des conditions normales, indiquer avec une grande précision la direction de la gravité.

La précision de l'estimation de la verticale est indiquée par l'erreur signée moyenne d'un sujet qui a pour tâche d'ajuster un objet longiligne sur la direction de la gravité. L'objet peut être un stimulus visuel, comme une ligne ou une barre dont l'orientation est contrôlée à distance, ou un objet solide, comme une baguette, orienté avec la main dans l'obscurité. La verticale visuelle est sans conteste celle qui a été la plus étudiée. De façon générale, les observations faites dans la modalité visuelle s'accordent assez bien avec les estimations de la verticale obtenues dans d'autres modalités (Pettorossi et al., 1998 ; Van Beuzekom et Van Gisbergen, 1999, 2000 ; Wood et al., 1998).

Dans l'obscurité, un sujet est capable d'orienter une ligne lumineuse avec une précision de 1° ou moins. C'est d'ailleurs une précision largement supérieure à celle des jugements des autres orientations de l'espace (Gentaz et Hatwell, 1996 ; Gentaz et al., 2001 ; Howard, 1986), y compris celle de l'horizontale. L'explication tient probablement au fait que la verticale est, pour le système nerveux central, une norme imposée par l'environnement gravitaire, alors que les autres orientations sont évaluées sur la base d'une métrique apprise. Lorsque l'on modifie les informations sensorielles fournies par l'un ou l'autre des systèmes sensoriels impliqués dans l'orientation ou lorsque l'on rompt expérimentalement la cohérence entre plusieurs d'entre eux, la précision de l'estimation de la verticale se détériore rapidement. Nous allons passer en revue dans cette section du document les effets principaux connus sur la verticale subjective, en montrant qu'ils résultent d'interactions différentes entre systèmes sensoriels et en exposant quelles sont les hypothèses explicatives avancées.

De façon générale, les conceptions traditionnelles de la verticale subjective conçoivent celle-ci comme la résultante d'une addition vectorielle de toutes les verticales signalées par les divers systèmes sensoriels. Selon Berthoz (1997), une alternative consisterait à penser la verticale subjective comme l'expression perceptive d'un modèle interne de la verticale, «modulée ou modifiée par la configuration des capteurs». Selon cette conception, la verticale subjective serait donc une lecture cognitive de processus qui visent à prendre en compte de façon proactive les conséquences de la gravité sur le corps et sur l'environnement (McIntyre et al., 1998 ; Papaxanthis et al., 1998). Quoi qu'il en soit, le concept de verticale subjective s'applique particulièrement bien au

problème posé par la désorientation spatiale en aéronautique, car si on se réfère à la définition générale fournie par Benson (1973) et mentionnée en introduction, la désorientation spatiale correspond à tout «incident où le pilote a une perception erronée de la position, du mouvement ou de l'attitude de son avion ou de lui-même par rapport au système de coordonnées fixe fourni par la surface de la terre et la verticale gravitaire». La verticale subjective aura donc une place primordiale dans les travaux expérimentaux qui composent cette thèse.

2.3.1. Manipulation des indices visuels

L'environnement visuel fournit dans des conditions normales de nombreux indices relatifs à la direction de la verticale, ce que Howard et collaborateurs appellent la cadre de référence visuel (cf. § 2.1.1). Lorsque la scène visuelle est inclinée par rapport à la gravité, l'erreur d'appréciation de la verticale est conséquente. La première démonstration de cet effet est due à Witkin et Ash (1948). Ils mesurent l'effet d'une inclinaison statique de la scène visuelle en demandant à leurs sujets d'estimer la verticale tout en faisant face à l'image d'une pièce aménagée, inclinée de 22° par rapport à la verticale gravitaire. Lorsque l'espace visuel est entièrement occupé par cette scène, l'erreur d'estimation est de 15° en moyenne, dans le sens de l'inclinaison de la scène. Un effet tout à fait similaire peut être obtenu en présentant simplement dans l'obscurité un cadre lumineux incliné autour d'une barre à ajuster à la verticale. L'effet est réduit, dû à la pauvreté des indices visuels et au manque de polarité du cadre (cf. § 2.1.1), mais ils restent consistants. Cet effet, appelé «effet du cadre et de la baguette» (rod-and-frame effect, Fig. 21) ou plus simplement effet cadre, peut être considéré comme le résultat de la compétition entre les informations visuelles et graviceptives (vestibulaires et somesthésiques) pour la détermination de la verticale subjective. A ce titre, l'effet cadre a longtemps été un objet d'étude privilégié dans les recherches portant sur les différences interindividuelles dans la pondération des informations sensorielles hétérogènes (cf. § 2.3.4). Par la suite, l'objectif des recherches entreprises sur l'effet cadre s'est tourné vers l'explication des déterminants neurophysiologiques et cognitifs du phénomène.

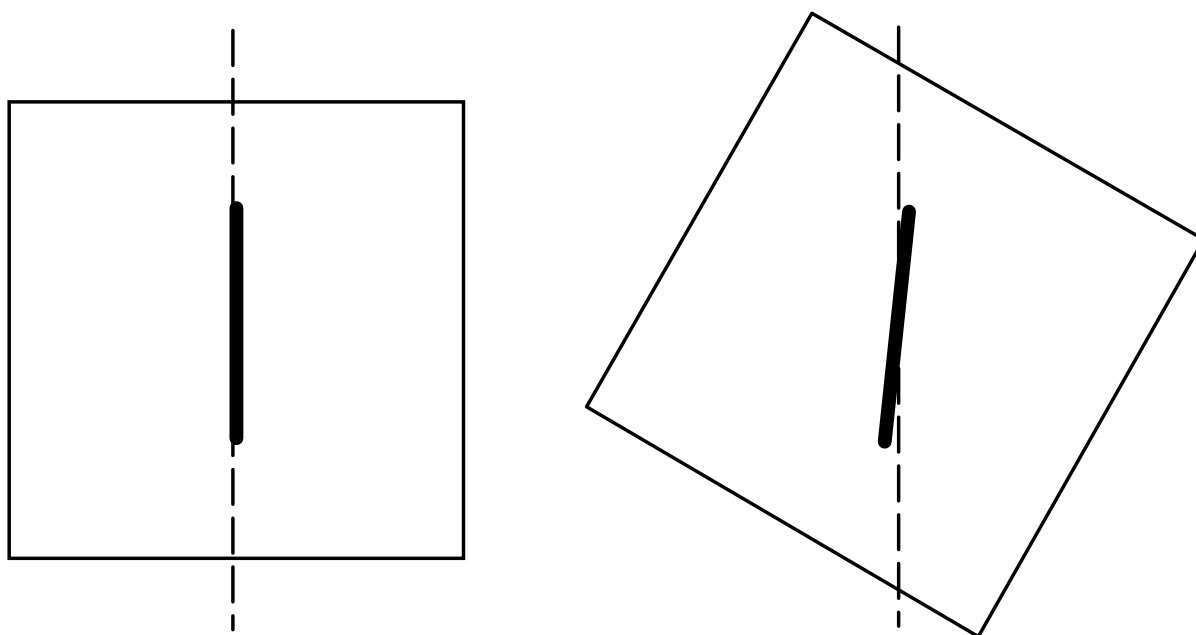


Figure 21 : L'effet cadre. Lorsqu'un sujet voit la baguette qu'il doit aligner avec la verticale, au travers d'un cadre incliné, il a tendance à incliner la baguette dans le même sens que le cadre.

Une première distinction importante doit être faite entre les cadres de petite taille ($< 10^\circ$ d'angle visuel) et les cadres de grande taille ($> 20^\circ$). Les premiers projettent sur la rétine centrale et induisent des illusions essentiellement géométriques (contraste d'orientation). En revanche, les cadres de grandes tailles se projettent sur la rétine périphérique et influenceraient par ce biais le fonctionnement des mécanismes responsables de l'orientation dans l'espace (pour une revue, voir Cian et al., 1995). L'effet de l'excentricité rétinienne du cadre est également démontré par le fait que c'est toujours le cadre visuel le plus externe qui induit le plus d'effet. Si le cadre le plus externe est circulaire, il réduit considérablement les effets d'un cadre incliné intérieur (Ebenholtz et Utrie, 1983).

Des cadres inclinés de grande taille induisent une torsion oculaire, un réflexe vestibulo-oculaire habituellement provoqué par des inclinaisons de la tête dans le plan frontal. De plus, lorsqu'ils font face à un cadre incliné, les sujets peuvent sentir leur tête ou leur corps incliné dans la direction opposée au cadre (Sigman et al., 1978, 1979). En fait, il a été fréquemment proposé que le biais perceptif observé sur la verticale subjective est la conséquence de cette inclinaison illusoire du corps, par un processus compensatoire. Cela revient à dire que l'effet cadre serait l'équivalent statique de la vection optocinétique rotatoire, c'est-à-dire l'illusion de mouvement du corps dans le

plan frontal, provoquée par une scène visuelle en rotation (Dichgans et al., 1972). A ceci s'ajoute le fait que l'effet cadre n'est pas influencé par la manipulation expérimentale des propriétés traitées par la vision focale, comme par exemple, la forme, la taille subjective et la profondeur. Babler et Ebenholtz (1989) en ont conclu que l'effet cadre pouvait être considéré comme «un phénomène automatique et non-cognitif» qui influencerait la perception de l'orientation spatiale à travers des voies sous-corticales où s'effectuent les interactions visuo-vestibulaires. Cependant, des contre-arguments existent. Tout d'abord l'illusion d'inclinaison du corps provoquée par un cadre incliné est considérablement plus faible que l'effet cadre correspondant (Cian et al., 1995 ; Sigman et al., 1979). De la même manière, la torsion oculaire induite est un phénomène de très petite taille, aux alentours de $0,5^\circ$, selon Goodenough et al. (1979).

D'autres travaux défendent l'idée que des processus de plus haut niveau sont impliqués dans la genèse de l'effet cadre et mettent l'accent sur le concept de référentiel spatial. DiLorenzo et Rock (1982) montrent que les sujets ont tendance à percevoir le cadre comme moins incliné qu'il ne l'est réellement et que cet «effet de redressement» est significativement corrélé avec l'effet cadre. Ces résultats peuvent être interprétés comme la conséquence de la force des indices visuels d'orientation à définir la direction perçue de la gravité, en dépit d'informations vestibulaires et somatosensorielles contradictoires (Rock, 1990). Une autre hypothèse est avancée par Luyat et Ohlmann (1997) sur la base d'expériences où le sujet, couché sur le dos, faisait face à un cadre incliné (par rapport à l'axe du corps), lui aussi placé à l'horizontale. Les résultats montrent un effet cadre qui peut difficilement être expliqué par des interactions visuo-vestibulaires, étant donnée la position du sujet. Les auteurs proposent alors que l'effet cadre serait la conséquence de l'inclinaison dans la direction du cadre du plan médian subjectif qui divise l'espace corporel et extracorporel sur la dimension droite-gauche et qui a souvent été considéré comme une référence majeure dans les tâches de localisation égocentrique (Jeannerod, 1988; Karnath et al., 1993).

Le rôle des informations visuelles dynamiques sur la détermination de la verticale subjective est mis en évidence par l'effet d'un disque visuel tournant dans le plan frontal du sujet. Lorsque celui-ci a pour tâche d'aligner sur la verticale une barre placée au centre de la scène en mouvement, il commet inévitablement une erreur dans la direction de la rotation. Cet effet s'accompagne d'une illusion de rotation du corps dans la direction opposée (Dichgans et al., 1972). Les deux paramètres principaux qui influencent ces effets sont l'étendue angulaire du dispositif tournant et sa vitesse de

rotation. Les deux illusions s'établissent progressivement dans le temps (18 s pour le dispositif de Dichgans et al., 1978 qui couvre 130° d'angle visuel) et mettent un temps équivalent à disparaître après l'arrêt de la rotation de la scène visuelle. Il paraît bien établi que ces effets sont déterminés en grande partie par les interactions précoces entre les informations vestibulaires et les informations visuelles dynamiques (pour une revue, voir Howard, 1986).

2.3.2. Manipulation de l'orientation corporelle

Incliner le corps en roulis donne également lieu à des erreurs dans l'estimation de la direction verticale (Betts et Curthoys, 1998). En général, pour des inclinaisons du corps entier allant jusqu'à 60°, les sujets tendent à percevoir la verticale dans la direction opposée à l'inclinaison du corps (l'effet Müller ou E-effect), alors que pour des inclinaisons corporelles supérieures à 60°, la verticale subjective est déviée dans la direction du corps (l'effet Aubert ou A-effect). L'effet Aubert est d'autant plus important que l'estimation de la verticale est effectuée immédiatement après la fin de la rotation, surtout si la phase de décélération de celle-ci est brutale (Howard, 1986). L'effet qui s'ajoute est dû à une déflexion des cupules des canaux semi-circulaires qui persiste après la fin de la rotation. Les relations évidentes entre l'orientation du corps et la verticale subjective ont conduit, dans un premier temps, à expliquer les effets Müller et Aubert respectivement par une surestimation et une sous-estimation de l'inclinaison réelle du corps, les «erreurs» étant attribuées à une perte de sensibilité otolithique lorsque la tête est fortement inclinée (baisse d'efficacité sensorielle de nature «mécanique»). Cette explication rend également compte du fait que la variabilité intraindividuelle des jugements de verticalité augmente avec l'amplitude de l'inclinaison corporelle.

Le modèle de Mittelstaedt (1983, 1986, 1995a), plus récent et fréquemment cité en référence, interprète l'effet de l'amplitude de l'inclinaison corporelle sur la verticale subjective comme la conséquence des variations dans la pondération entre, d'une part, les signaux d'origine otolithique et, d'autre part, les indices fournis par le système somatosensoriel (afférences tactiles, proprioceptives et viscérales). L'information otolithique pousse le système à compenser les inclinaisons de la tête ou du corps entier et serait dominante pour les inclinaisons de faibles amplitudes. L'information somatosensorielle quant à elle attirerait la verticale subjective vers le vecteur idiotropique, la dénomination donnée par Mittelstaedt (1983) à la représentation interne

de l'axe du corps, et serait dominante pour les grandes inclinaisons (Yardley, 1990). Lorsque l'inclinaison est limitée à la tête (corps droit), des expériences variées montrent des effets Müller (Luyat et al., 2001; Wade, 1968), des effets Aubert (Guerraz et al., 1998a; Parker et al., 1983), ou pas d'effet (DiLorenzo et Rock, 1982). Cette disparité des observations pourrait suggérer l'existence de grandes différences interindividuelles dans la combinaison des informations otolithiques et de la proprioception du cou lorsque ces informations sont utilisées pour compenser les inclinaisons de la tête. Notons enfin que les processus cognitifs ont une influence potentielle importante dans la détermination des effets Aubert et Müller, puisque des sujets en position verticale et capables de s'imaginer inclinés dans le plan frontal montrent de tels effets sur la verticale visuelle (Mertz et Lepecq, 2001).

2.3.3. Verticale subjective et perception de l'orientation du corps

Une hypothèse naturelle conduit à penser que l'inclinaison de la verticale subjective et les illusions d'inclinaisons corporelles seraient deux expressions d'un même phénomène, autrement dit que l'inclinaison de la verticale subjective serait la conséquence directe d'une perception erronée de l'orientation du corps par rapport à la gravité. Selon cette hypothèse, une manipulation expérimentale influençant la verticale subjective devrait provoquer une illusion d'orientation du corps symétrique par rapport à la verticale subjective obtenue sans perturbation. Or, l'orientation perçue du corps ne correspond pas toujours à l'amplitude de la déviation de la verticale subjective. C'est le cas pour l'effet cadre, l'effet d'un disque en rotation, ou lorsqu'on compare la verticale subjective et la verticale posturale (lorsque le sujet doit réorienter son corps à la verticale). C'est pourquoi la thèse selon laquelle la verticale subjective et la perception de l'orientation des axes longitudinaux du corps sont prises en charges par deux voies distinctes du système perceptif est de plus en plus défendue (Anastasopoulos et al., 1997 ; Bisdorff et al., 1996 ; Bronstein, 1999 ; Darling et Hondzinski, 1997 ; Ito et Gresty, 1996, 1997, Mast et Jarchow, 1996, Mittlestaedt, 1995). Le modèle de van Beuzekom et van Gisbergen (2000 ; Fig. 22) propose que l'orientation de la tête par rapport à la gravité, reconstruite à partir des informations canaliculaires et otolithiques, est utilisée de façon identique pour générer les deux percepts. L'information somatosensorielle quant à elle interviendrait différemment. Pour l'établissement de la verticale subjective, elle contribuerait surtout à améliorer la perception de l'orientation de la tête par rapport à la gravité en comblant les déficiences vestibulaires. L'établissement d'une perception

correcte de l'orientation de la tête paraît en effet crucial pour établir un référentiel céphalocentré correctement orienté dans l'espace gravitaire. L'inclinaison corporelle subjective serait déterminée par une autre part des informations somatosensorielles, avec l'accent mis sur celles fournies par les gravicepteurs du tronc, mais aussi sur les informations tactiles et de pression. De plus, van Beuzekom et van Gisbergen (2000) font l'hypothèse de l'existence de modèles internes modulant les sorties finales des deux systèmes en fonction de la probabilité *a priori* qu'une inclinaison corporelle intervienne réellement. Ces modèles internes, probablement mis en place par le système nerveux central pour lutter contre les illusions sensorielles, sont différents pour la verticale subjective et l'inclinaison corporelle subjective.

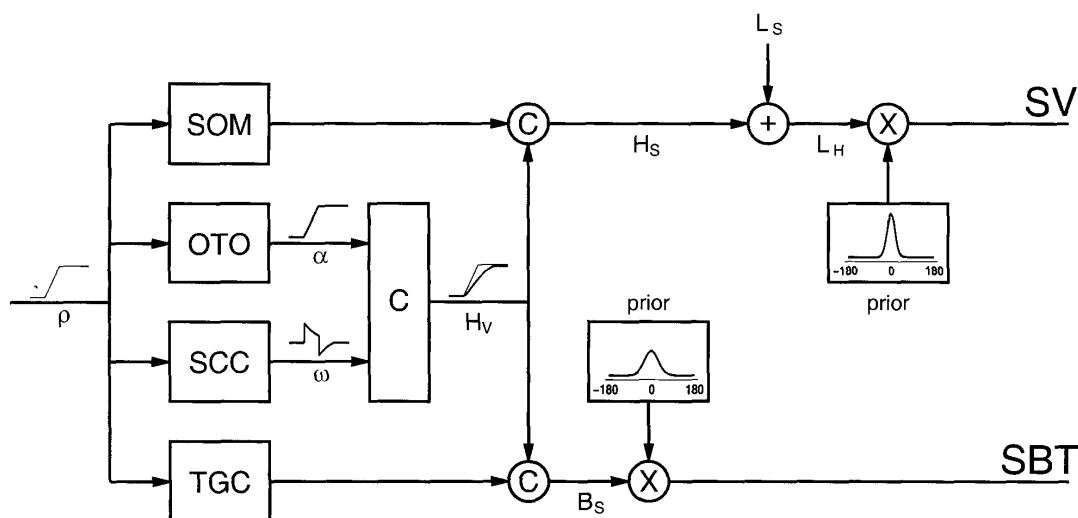


Fig. 22 : Le modèle de Van Beuzekom et Van Gisbergen (2000) qui distingue deux modules parallèles pour l'élaboration de la verticale subjective et de l'inclinaison corporelle subjective (SBT). Les deux modules sont alimentés par la représentation de l'orientation de la tête dans l'espace, déterminée sur la base des informations otolithiques (OTO) et canaliculaires (SCC). Ils prennent en compte des informations somatosensorielles différentes avec un rôle particulier des afférences des gravicepteurs du tronc (TGC) pour l'inclinaison corporelle subjective. Le modèle suppose également l'intervention de modèles internes différents (prior) pour les deux percepts.

2.3.4. Variabilité associée à la verticale subjective : influence des styles perceptifs

Quels que soient les effets étudiés, les altérations de la verticale subjective sont caractérisées par une grande variabilité interindividuelle. Dès Witkin et Ash (1948), il est apparu que les individus diffèrent largement dans l'amplitude des effets cadre induits chez eux. Un sujet peut aligner parfaitement la barre sur la verticale gravitaire, quelles que soient la taille et l'orientation du cadre visuel, un autre peut orienter la barre parallèle aux bords du cadre, ce malgré une consigne clairement expliquée. Ces deux types de sujets se situent aux extrémités d'une population hétérogène dans leur susceptibilité à l'effet cadre. Les plus influençables sont qualifiés de dépendants à l'égard du champ, les plus réfractaires à l'influence du cadre sont appelés indépendants à l'égard du champ. Cette dichotomie dépasse largement l'effet cadre (Huteau, 1987) et a alimenté un courant de recherche sur les styles perceptifs.

Les styles perceptifs, ces «préférences» inconscientes de chacun dans le traitement de l'information se rapprochent de la notion de vicariance différentielle, introduite par Reuchlin (1978), qui peut se résumer à deux propriétés principales :

- (1) Chaque individu possède une partie, sinon la totalité, du répertoire des processus susceptibles de s'adapter à une situation donnée ;
- (2) Chez un individu donné, certains processus sont plus facilement évocables que d'autres.

Selon Ohlmann (1990a, 1990b), cette évocabilité différentielle est en œuvre dans la sélection des référentiels spatiaux et forme la source de la variabilité interindividuelle observée dans les études de la verticale subjective. C'est pourquoi Goodenough et al. (1985) observent une corrélation négative, à effet Aubert constant, entre une situation expérimentale où des sujets droits font face à un cadre incliné et une situation où le cadre est droit, mais les sujets inclinés. Autrement dit, les sujets peu aptes à faire abstraction de l'influence des références visuelles lorsqu'elles sont biaisées savent mieux en tirer profit lorsque ce sont les conditions posturales qui influent sur la verticale subjective. Dans une situation favorable, c'est-à-dire une situation où les diverses sources d'information sont présentes et fiables, l'ensemble des individus se comporte de la même façon puisqu'ils disposent tous de l'information suffisante pour

s'orienter correctement. Lorsque la situation perturbe les processus privilégiés du sujet, celui-ci voit ses performances se dégrader plus vite qu'un autre sujet qui s'appuie sur des processus différents.

Qu'en est-il alors des situations extrêmes où une modalité sensorielle devient totalement inopérante, par exemple ? C'est le cas parfois à bord des aéronefs, lorsque les informations du système vestibulaire n'ont plus aucune pertinence pour la réalisation de la tâche de pilotage. Selon Ohlmann et Marendaz (1991), les individus convergeraient vers un même ensemble de processus, les seuls en adéquation avec la forte spécialisation exigée par une situation difficile. Les travaux de Brenet et al. (1988) illustrent bien cette convergence. Des sujets dépendants à l'égard du champ, debout les pieds écartés, présentent un déficit de performance dans une tâche visuo-spatiale par rapport à un groupe de sujets indépendants à l'égard du champ. Lorsque la station debout devient plus difficile à maintenir (position de Romberg sensibilisé, un pied devant l'autre), l'écart entre les deux populations se réduit, non pas par une détérioration de la performance des sujets indépendants à l'égard du champ, mais bien par une amélioration de celle des sujets dépendants à l'égard du champ, ce qui tend à prouver que l'instabilité posturale pousse le système nerveux central à se fier d'avantage aux informations les plus utiles pour régler le problème, les informations vestibulaires et kinesthésiques, au détriment des informations visuelles. La diminution de la variabilité interindividuelle dans les situations extrêmes a un coût, celui d'augmenter la variabilité intraindividuelle moyenne puisque certains sujets fonctionnent avec des processus peu souvent mis en œuvre, donc non-optimisés. Pour présider à la sélection des référentiels spatiaux, Ohlmann et Marendaz (1991) appellent la notion d'affordance, introduite par Gibson (1979) dans le cadre de l'approche écologique de la perception et de l'action et qui peut se définir comme la perception d'une utilité. Le système perceptif déterminerait quelles conduites et quelles actions sont possibles à partir d'invariants présents dans l'environnement, des propriétés de l'organisme, et du contexte. Il sélectionnerait sur cette base les processus spatiaux adéquats. Au-delà des différences philosophiques entre l'approche écologique et les approches classiques de la perception, cette notion d'affordance n'est pas incompatible avec la notion de modèle interne. En effet, nous avons vu que ces processus supposés opérer dans la perception des propriétés de l'environnement auraient pour fonction de simuler les propriétés du corps ou de l'organisme dans un but prédictif.

Les modèles internes se perfectionnant grâce à l'expérience, il est fort probable qu'une expérience prolongée ou répétitive d'une situation sensorielle extrême vienne modifier l'évocabilité des processus mis en jeu préférentiellement par un individu, dans une certaine mesure tout au moins. Cette hypothèse reçoit des arguments des travaux de Young et al., (1986) qui montrent que des astronautes revenant de mission en apesanteur, donc d'un milieu où l'information gravitaire est absente et où l'on apprend à se fier aux indices visuels pour s'orienter, montrent une légère augmentation de leur score au RFT. La seule étude que nous avons pu répertorier et qui évalue la dépendance à l'égard du champ chez les pilotes montre qu'ils sont plus dépendants à l'égard du champ que la moyenne (Long, 1975). Previc (2000) mentionne également que les pilotes expérimentés tendent à être plus dépendants à l'égard du champ que les novices. Or, un des buts principaux à atteindre lors de l'apprentissage du pilotage des avions de combats est ce que les instructeurs appellent la dominance visuelle, c'est-à-dire la capacité pour le pilote à faire abstraction des perceptions engendrées par les informations vestibulaires pour ne se fier qu'aux repères visuels externes et aux instruments de bord.

3. L'ergonomie sensorielle au service de la lutte contre la désorientation spatiale

Le problème de la désorientation spatiale s'est très vite posé aux concepteurs œuvrant dans le domaine de l'aéronautique et c'est pour suppléer aux insuffisances du système d'orientation spatiale de l'organisme au cours du vol que divers instruments de bord, tels que l'horizon artificiel ou l'indicateur de virage, ont été mis au point. De nombreux travaux sont menés actuellement pour essayer de trouver de nouvelles solutions à la désorientation spatiale, en fonction des nouvelles connaissances dans le domaine, mais aussi en fonction des technologies émergentes. Nous poserons le problème de la dominance visuelle en aéronautique, en montrant la place que peut prendre la conception de l'instrumentation, et quelques exemples de solutions potentielles seront développés à la suite.

3.1. Problème du pilotage à dominance visuelle

L'entraînement au vol sans visibilité permet d'apprendre à acquérir les informations nécessaires au pilotage à partir des données fournies par le tableau de bord, sans tenir compte des sensations vestibulaires et kinesthésiques. C'est ce que l'on appelle l'entraînement à la dominance visuelle et à la suppression vestibulaire (Montgomery et Montgomery, 1989). L'accent est mis par de nombreux auteurs sur l'importance de cet entraînement, dans la mesure où, dans de nombreuses conditions, les seules informations pertinentes pour maintenir une ligne de vol correcte sont celles fournies par les instruments. Cependant, le pilotage aux instruments contredit les mécanismes fondamentaux de la vision. En effet, comme nous l'avons vu, les informations visuelles impliquées habituellement dans l'orientation proviennent d'un champ visuel large et sont traitées essentiellement par la vision périphérique. En vol aux instruments, les informations sont disponibles par l'intermédiaire de la vision centrale, c'est-à-dire la vision qui sous-tend l'identification des objets, à partir d'interfaces ne dépassant pas 5° d'angle visuel. Ces données, souvent présentées sous forme symbolique, n'ont pas le caractère familier des repères fournis par le monde extérieur et n'ont pas leur force. Le traitement du contenu spatial symbolique se fera donc par des processus cognitifs, appris, et non par les processus sensorimoteurs normalement

dévolus à cet effet. Ce n'est que grâce à l'entraînement au vol sans visibilité que le pilote arrive, à partir de ces données et des connaissances qui lui permettent de les interpréter, à déterminer avec précision la position de son avion dans l'espace. Bien sûr, l'être humain a la caractéristique d'être très adaptable et de pouvoir associer ainsi de nouvelles configurations d'informations à une situation environnementale. C'est pourquoi substituer aux informations naturelles des informations symboliques permet la plupart du temps le pilotage de l'avion. Cependant, dans des conditions inhabituelles, étonnantes ou stressantes, les premières facultés à se détériorer sont les fonctions cognitives, particulièrement celles qui ont été acquises le plus récemment dans l'histoire de l'individu. A ce moment, le pilote risque d'avoir recours instinctivement aux mécanismes naturels d'orientation qui, en l'occurrence, ne sont pas fiables.

Le vol en formation (Fig. 23) illustre le danger du vol à dominance visuelle. Il est d'ailleurs souvent indiqué par les pilotes comme l'une des situations les plus inductrices de désorientation spatiale. Chaque équipier doit suivre son leader et son travail aérien consiste à maintenir sa place dans la formation, par rapport au leader et aux autres équipiers. Deux facteurs sont importants à considérer dans ces conditions : obligé de ne guère quitter des yeux le leader, l'équipier ne dispose que de très peu de temps pour jeter un coup d'œil sur ses instruments de bord, et l'avion du leader ne se comporte en aucune façon comme un indicateur d'assiette. Il en découle que, par mauvais temps, lors d'un vol de nuit ou si la formation pénètre brutalement dans les nuages, l'équipier qui perd de vue son leader doit se réorienter dans le référentiel gravitaire, alors qu'auparavant il pilotait dans un mode relatif. Il peut se trouver complètement désorienté. Il lui faudra alors un certain temps et un effort de volonté pour ne pas tenir compte de ses informations vestibulaires et se réorienter à partir des seuls instruments de bord. On se rend facilement compte du danger d'une telle situation à proximité du sol.



Figure 23 : le vol en formation par temps nuageux constitue la circonstance d'occurrence de la désorientation spatiale la plus souvent citée.

Les caractéristiques de la dominance visuelle ont deux conséquences. Premièrement, cette faculté ne peut-être conservée que par la répétition régulière du vol aux instruments. L'entraînement du pilote est donc primordial. Deuxièmement, il est nécessaire de concevoir au mieux les afficheurs, de telle sorte qu'ils soient compatibles avec les caractéristiques du traitement de l'information chez l'homme. L'information qu'ils fournissent doit pouvoir être intégrée et interprétée le plus rapidement et le plus facilement possible pour pouvoir corriger de façon appropriée l'attitude de l'avion, tout en ne négligeant pas d'autres tâches. Par exemple, les stimulations visuelles donnant lieu à un effet «pop-out» sont particulièrement recherchées. On dit qu'une information provoque un effet «pop-out» lorsqu'elle attire automatiquement l'attention du sujet vers elle et lorsqu'elle est traitée de façon automatique, c'est-à-dire lorsque le temps nécessaire pour la localiser est indépendant du nombre d'informations disponibles sur le tableau de bord (Treisman et Gelade, 1980). Un changement brutal de luminance provoque ce genre d'effet, ce qui n'est pas le cas d'un changement brutal de couleur.

Par conséquent, les afficheurs devraient devenir plus lumineux ou clignoter pour indiquer des valeurs dangereuses, plutôt que de passer à la couleur rouge.

La figure 24 représente plusieurs types d'horizon artificiel, dont on a toujours cherché la meilleure mise en forme. D'autres recherches essaient d'intégrer plusieurs afficheurs en un seul (Weinstein et al., 1994), avec l'idée que la charge de travail du pilote et les erreurs générées par la comparaison des différents indicateurs seraient supprimées, facilitant ainsi une perception plus immédiate de l'orientation. Plusieurs afficheurs en trois dimensions ont été testés à cette fin sans donner de résultats positifs. D'autres solutions ont rencontré plus de succès lors de leur test en simulateur (Braithwaite et al., 1998d), mais elles se heurtent souvent au jugement des pilotes qui sont naturellement hésitant à changer des procédures habituelles acquises depuis longtemps (ce «conservatisme» explique sans doute pourquoi les avionneurs donnent encore à leurs afficheurs d'horizon artificiel l'aspect d'une boule en rotation, sans aucune autre utilité que de présenter l'information sous une forme familière).



Figure 24 : Différents types de symbologies synthétiques utilisées pour l'indicateur d'horizon artificiel.

Les processus cognitifs nécessaires au pilotage aux instruments se distinguent des processus sensorimoteurs par leur caractère conscient, mais également par les ressources attentionnelles qu'ils exigent. Or, les ressources attentionnelles de l'information sont limitées. C'est pourquoi deux tâches de nature cognitive effectuées simultanément ne peuvent pas être réalisées sans baisse de performance par rapport à chacune des tâches considérée isolément. En vol, par exemple, une charge de travail trop importante mobilisera l'ensemble des ressources cognitives du pilote qui risque de négliger ses instruments et de s'exposer ainsi à la désorientation spatiale. En effet, l'orientation correcte de l'avion dépend de la capacité du pilote à sélectionner les

informations pertinentes issues du monde extérieur ou de ses instruments. Le parcours des instruments se fait normalement en fonction de procédures apprises (le «cross-check», voir Marlowe, 1985), car le pilote doit distribuer son attention de manière ordonnée entre les divers indicateurs de telle sorte qu'il puisse apprécier complètement l'attitude et la ligne de vol de son avion. Or, un pilote, même expérimenté, peut restreindre son attention à une seule tâche à accomplir, particulièrement si elle est difficile, ou lorsqu'un événement inattendu apparaît. Il risque à cet instant de négliger toute autre information, y compris celles relatives à l'orientation en vol. Dans les cas extrêmes, on parle du phénomène de fascination. Un tel rétrécissement de l'attention est le plus souvent associé au vol aux instruments, mais il peut également survenir dans de bonnes conditions de visibilité, par exemple lorsque le pilote néglige de contrôler son altitude lorsque toute son attention est focalisée sur l'alignement de son avion sur une cible.

3.2. Remise en question de l'indicateur d'attitude «inside looking out»

La littérature relative à l'orientation du pilote en vol décrit fréquemment la perspective spatiale du pilote comme un horizon en mouvement par rapport à un cockpit stable. Cette hypothèse a largement contribué à l'adoption d'indicateurs d'attitude figurant un horizon mouvant, avec l'idée qu'ils assurent une bonne compatibilité spatiale entre la symbologie et la vision que les pilotes a à travers la verrière du cockpit. Cependant, ce type d'afficheur entraîne l'apparition d'erreurs d'inversion (*reversal errors*) lors des transitions visuelles entre le monde extérieur et les instruments. Le pilote a tendance à interpréter les mouvements de l'horizon artificiel comme étant un mouvement des ailes de l'avion. Cette erreur devient apparente lorsque le pilote effectue un mouvement en roulis ou en élévation dans la direction opposée à celle souhaitée. Ces observations, associées au fait qu'elles sont plus fréquentes chez les novices, mettent en doute le caractère naturel de la représentation de l'attitude en termes de cockpit stabilisé.

Un autre type d'argument vient renforcer cette idée. On a remarqué en effet que les pilotes ont tendance à garder leur tête alignée sur la verticale lorsqu'ils cherchent des indices visuels à l'extérieur du cockpit. Des expérimentations récentes ont montré qu'il s'agissait d'un réflexe, appelé réflexe cervical optocinétique, qui commande les muscles

du cou à partir d'informations visuelles, sans intervention des signaux vestibulaires. La fonction de ce réflexe est de stabiliser l'image de l'horizon et d'en faire ainsi un indice spatial primordial. Simultanément, des informations secondaires sont fournies par les mouvements relatifs du cockpit, détectés en vision périphérique. Cette configuration d'information induit la perception d'un mouvement des structures du cockpit par rapport à un horizon stabilisé et plaident donc pour le choix d'un indicateur approprié de type «*outside looking in*» (comme si le pilote percevait les mouvements des ailes en étant à l'extérieur de l'appareil) par opposition aux afficheurs traditionnels appelés «*inside looking out*» (Braithwaite et al., 1998a ; Merryman et Cacioppo, 1997 ; Patterson et al., 1997 ; Smith et al., 1997).

Même si l'idée d'adopter un nouveau type d'indicateurs d'attitude est de plus en plus courante, elle risque d'entraîner la réticence des pilotes, étant donné le caractère traditionnel de cet instrument. La solution a pourtant été testée par l'aviation militaire russe dans le MIG-29. La mise au point des afficheurs incorporés dans le casque du pilote pourrait être une opportunité pour développer des indications d'attitudes compatibles avec un modèle correct des mécanismes de l'orientation en vol.

3.3. L'horizon de Malcolm (Peripheral Vision Display)

Richard Malcolm proposa à la fin des années 60 l'idée d'un horizon artificiel révolutionnaire (Malcolm, 1984). Il est parti de la constatation que les informations les plus utilisées pour l'orientation spatiale en conditions normales sont celles fournies par la vision périphérique et sont traitées sur un mode sensorimoteur, sans qu'aucun effort ne soit requis. Parallèlement, le pilotage aux instruments met en jeu la vision centrale et nécessite la manipulation d'informations symboliques, ce qui implique une augmentation de la charge de travail du pilote. L'idée de Malcolm était de transférer une partie au moins de l'information relative au contrôle de l'attitude vers les processus sensorimoteurs de la vision périphérique. Pour ce faire, il proposa de projeter sur toute la largeur du tableau de bord une ligne lumineuse dont l'orientation est maintenue constante par la plate-forme inertielle en charge de l'horizon artificiel classique. Ce dispositif permet de renseigner le pilote, par l'intermédiaire de la vision périphérique, sur l'attitude de l'avion, en roulis et en tangage, tout en libérant la vision centrale pour l'exécution d'autres tâches et en réduisant la charge de travail.

La mise en œuvre de ce dispositif dans des simulateurs de vol ou dans des aéronefs a posé de nombreux problèmes techniques. De plus, l'accueil fait par les pilotes à ce dispositif n'a pas toujours été positif (Nordwall, 1989). Certains considéraient que la ligne lumineuse perturbait la lecture des autres indicateurs de la planche de bord. D'autres estimaient que les mouvements de la ligne en tangage étaient beaucoup moins naturels que ceux en roulis. En effet, l'amplitude de déplacement de la ligne sur cet axe ne reflète pas forcément l'amplitude réelle du mouvement de l'avion dans la mesure où, si c'était le cas, la ligne disparaîtrait du tableau de bord à chaque manœuvre importante en tangage. Plusieurs gains sont d'ailleurs disponibles pour le pilote et utilisables pour des phases de vol différentes.

Malgré ces quelques inconvénients, des tests effectués en simulateur sur une quarantaine de pilotes des forces armées canadiennes ont donné des résultats tout à fait positifs. L'expérience a consisté à provoquer une succession de situations d'urgence à une ou deux minutes d'intervalle jusqu'à ce que le pilote, dépassé par la charge de travail trop lourde, perde le contrôle de l'appareil. Les résultats montrent qu'avec l'horizon de Malcolm, cinq urgences pouvaient être prises en charge par le pilote sur une période de dix minutes, alors qu'avec les instruments traditionnels uniquement, trois de ces épisodes suffisaient à perdre le pilote. Lors du *debriefing*, de nombreux pilotes regrettèrent la disparition de la ligne lumineuse au moment même où elle aurait été la plus utile. En fait, la ligne n'a jamais disparu, mais les informations visuelles périphériques étaient traitées sous le seuil de la conscience. Cela démontre que les pilotes n'ont aucun intérêt à fixer la ligne lumineuse, mais doivent plutôt accorder leur attention à d'autres tâches et laisser le système nerveux intégrer les informations visuelles périphériques au niveau sensorimoteur.

L'horizon de Malcolm possède donc un potentiel certain à réduire la désorientation spatiale en vol. Il semble également libérer des capacités de traitement de l'information, utilisables pour d'autres tâches à accomplir. Le dispositif a été installé à la fin des années 80 dans une des flottes de l'U.S. Air Force, mais la généralisation de son utilisation nous est inconnue.

3.4. Prospective : et les autres sens?

L'instrumentation utilisée à ce jour pour traiter la désorientation spatiale est donc essentiellement délivrée par le canal visuel. Or, le système vestibulaire et la somesthésie participent grandement à la perception de l'orientation dans l'espace. Fournir des informations adaptées par le biais de ces modalités sensorielles peut donc être envisagé, en théorie. Si peu d'initiatives ont été prises dans cette direction, c'est sans doute à cause de la difficulté à stimuler ces sens de façon contrôlée, contrairement à la vision.

3.4.1. *Les stimulateurs tactiles*

Les stimulations tactiles pourraient aussi participer à la perception de l'orientation, comme le montre le développement actuel du Tactile Situational Awareness System (TSAS) par le ministère de la défense américain (Dickey et Rogers, 1999). Ce système, dont le but est de faciliter le traitement et la prévention de la désorientation spatiale, se présente sous la forme de «tacteurs» encastrés dans le gilet du pilote, qui transmettent l'information de position par la pression, la vibration, ou d'autres méthodes (Fig. 25). La sensation globale est semblable à celle produite par les fluides circulant dans le corps, indiquant ainsi dans quelle direction se trouve le bas.

Le système a été testé en vol, sur hélicoptère. Les démonstrations préliminaires et finales de faisabilité du TSAS ont montré que l'orientation spatiale peut être mise à jour par le sens du toucher et ce de façon continue. Le test a été également effectué en simulateur de vol. Les concepteurs affirment que ce système réduit les problèmes d'orientation spatiale, ainsi que la charge de travail du pilote pendant les manœuvres critiques (le vol plané, l'approche et l'atterrissage). Le bénéfice associé aux stimulations tactiles dans ce cas est à rapprocher du fait qu'il n'existe pas de cas connu de désorientation spatiale d'origine somesthésique. On peut alors penser que cette modalité sensorielle est peut-être la moins perturbée par les caractéristiques du déplacement aérien et la plus apte à fournir des informations pour lutter contre la désorientation spatiale.



Figure 25 : Le gilet de stimulation tactile développé par l'Armée Américaine pour les pilotes d'hélicoptères.

3.4.2. La stimulation vestibulaire

L'appareil vestibulaire n'est pas normalement accessible à une manipulation directe comme le sont la vision, le toucher et l'audition. Pourtant, il est tout à fait possible de produire une stimulation vestibulaire sans qu'il y ait un mouvement de la tête ou du corps entier. On pourrait imaginer de produire des stimulations vestibulaires contrôlées qui viendraient compenser un problème de désorientation : par exemple maintenir la stimulation des canaux semi-circulaires lorsque l'avion est en vrille, afin que le pilote continue à percevoir la rotation bien après la fin de la constante de temps du canal. Il existe deux techniques spécifiques, la stimulation calorique et la stimulation galvanique, utilisées par les médecins ORL pour tester l'intégrité du système vestibulaire chez leurs patients.

La première de ces techniques est la stimulation calorique : si on fait circuler un fluide (chaud ou froid) dans l'oreille, on produit une excitation (ou une inhibition) du labyrinthe concerné. Le système vestibulaire fonctionnant *en push-pull* de façon bilatérale, une telle stimulation produit un déséquilibre du système (à condition que le labyrinthe stimulé soit intact), avec pour conséquence un nystagmus oculaire, des

vertiges intenses pouvant mener à une perte d'équilibre et même à des nausées. La stimulation calorique influence également la perception de la verticale (al-Benayan et al., 1999), mais la technique n'est pas applicable au pilote, car non contrôlable (tout ou rien).

La seconde technique, la stimulation galvanique, est en théorie plus contrôlable : il est possible de produire une stimulation des nerfs vestibulaires par stimulation électrique appliquée sur les os mastoïdiens, sous l'oreille. La technique est utilisée en recherche comme un moyen d'accéder au fonctionnement du système vestibulaire, et en particulier à celui des otolithes. Elle n'a apparemment jamais été considérée comme une suppléance possible à la désorientation d'origine vestibulaire.

PARTIE EXPERIMENTALE I : Effets d'un cadre visuel solidaire de la tête sur la verticale subjective – implications potentielles pour la conception des afficheurs de casque en aéronautique

1. Introduction

Les afficheurs de casque (helmet-mounted displays selon la terminologie anglaise) sont de plus en plus développés dans l'optique de leur utilisation en réalité virtuelle et en réalité augmentée (Loomis et al., 1999). En réalité virtuelle, un écran miniature inclus dans un casque fournit une image à chaque œil pour créer un monde visuel synthétique dans lequel l'observateur est immergé. La réalité augmentée consiste quant à elle à surposer des informations visuelles au monde réel en les projetant sur la visière d'un casque. Cette dernière technique est d'ores et déjà largement utilisée dans l'aviation de combat (Fig. 26). Elle a l'avantage de permettre la présentation d'informations visuelles solidaires des mouvements de la tête, de façon à ce que ces informations restent constamment disponibles dans le champ de vision du pilote quelle que soit l'orientation de sa tête. Les afficheurs de casque génèrent beaucoup d'intérêt chez les concepteurs en aéronautique, car ils ont le potentiel de transformer fondamentalement les paramètres du combat aérien. L'application actuelle principale est de permettre au pilote de sélectionner une cible en venant la placer au centre d'un viseur dont la position est fixe dans le casque, ce qui revient à viser très rapidement à la suite d'une simple réorientation de la tête. Le pilote n'a donc pas besoin de quitter des yeux l'environnement externe pour se référer aux instruments de bord. Le viseur de casque est maintenant considéré comme un élément essentiel dans l'architecture du système d'arme et la plupart des forces armées occidentales en ont inclus dans leurs avions ou sont sur le point de le faire.

Au-delà du système de visée, les progrès technologiques effectués dans le domaine font envisager aux concepteurs d'inclure d'autres indicateurs dans les afficheurs de casque, y compris des indicateurs de l'attitude de l'avion. Ces indicateurs

sont susceptibles eux aussi d'être asservis à l'orientation de la tête (Cohen et al., 2001). Le but de la première partie expérimentale de ce travail de thèse est d'évaluer les modifications éventuelles de la perception de l'orientation spatiale, que pourrait provoquer l'inclusion dans les afficheurs de casque de références visuelles fixes par rapport à la tête.



Fig. 26 : Exemple d'afficheur de casque utilisé dans l'aviation de combat. Des informations visuelles projetées sur l'intérieur de la visière se superposent à l'environnement visuel externe.

Pour percevoir correctement l'orientation d'un objet visuel dans l'espace, le système nerveux central doit transposer l'information rétinienne dans un référentiel géocentré, défini par la direction de la gravité. De nombreux auteurs s'accordent à dire que s'orienter dans le référentiel gravitaire implique une chaîne de transformation de coordonnées impliquant des sources variées d'informations (Howard, 1986). La projection de l'image sur la rétine doit être encodée et mise en rapport avec l'orientation des yeux dans leur orbite, ce qui implique la prise en compte des signaux de position des yeux. Les informations vestibulaires doivent également être considérées, puisqu'elles renseignent sur l'orientation et les déplacements de la tête. Enfin,

l'information propriosomesthésique utilisée pour réguler la posture fournit le lien entre la position de la tête dans l'espace et les forces de contact du corps au sol (Mergner et Rosemeier, 1998). En d'autres termes, l'orientation d'un objet visuel par rapport à la gravité est obtenue par la transposition des coordonnées rétinienne dans un référentiel géocentré en passant par des étapes intermédiaires définies dans des référentiels centrés sur la tête ou sur le tronc. Des arguments neurophysiologiques supportent largement une telle conception. Il a notamment été démontré chez le singe que des populations de neurones multimodaux distribués dans le cortex pariétal mettent en œuvre de telles transformations de coordonnées sensorielles (Andersen et al., 1997 ; Brotchie et al., 1995 ; Duhamel et al., 1998 ; Snyder et al., 1998).

Au regard de ces considérations sur la construction des référentiels spatiaux, la présentation d'informations visuelles solidaires des mouvements de la tête met l'utilisateur d'un afficheur de casque face à une situation inhabituelle. En effet, lorsque le pilote bouge la tête, les informations visuelles ajoutées bougent dans l'espace extra-personnel tout en restant fixes dans le référentiel de la tête. Cette configuration d'informations n'a pas d'équivalent dans des conditions naturelles. En effet, les coordonnées relatives d'un objet visuel par rapport à la tête varient habituellement dès lors que la tête (ou l'objet observé) bouge dans l'espace. Cela implique que le système nerveux central n'a probablement pas évolué pour traiter des références visuelles solidaires des mouvements de la tête et pourrait donc être confronté à un conflit informationnel. Cette possibilité est d'autant plus probable si l'on envisage son implication dans le domaine de la perception des orientations. Considérons l'exemple d'un concepteur d'afficheurs de casque qui désirerait fournir au pilote, dans la visière du dispositif, une série d'indications qui peuvent être utiles lorsque le pilote quitte des yeux les instruments du cockpit pour explorer l'environnement extérieur. Une façon de présenter ces indications sans obstruer le champ de vision du pilote pourrait consister à les disposer parallèlement à l'axe vertical de la tête, de chaque côté de la visière. Cette solution reviendrait à inclure des informations visuelles orientées, attachées à la tête, qui s'inclineraient par rapport à la verticale dès lors que l'utilisateur de l'afficheur de casque inclinerait lui-même sa tête. Or, nous avons vu qu'à la fois les références visuelles inclinées (cf. 1.3.1) et les inclinaisons de la tête (cf. 1.3.3) détériorent les jugements de verticalité.

Les deux expériences présentées ici étudient l'influence sur la verticale subjective d'un cadre visuel solidaire des mouvements de la tête, lorsque la tête ou le

corps entier du sujet est incliné en roulis. L'obtention d'un cadre incliné d'une amplitude identique à celle de la tête a été rendue possible par l'utilisation d'un casque vidéo. Porter cet appareil donne la sensation de voir un écran céphalocentré rectangulaire dont les contours sont clairement visibles. Ainsi, quelle que soit l'orientation de la tête du sujet, l'axe vertical de symétrie du cadre reste constamment aligné avec l'axe vertical de la tête. L'expérience 1 s'intéresse tout d'abord à l'influence du port d'un tel dispositif sur la verticale subjective, lors d'inclinaisons de la tête, chez des sujets assis. Une mesure de ces effets est réalisée. La question de l'additivité des effets visuels (ceux liés à l'orientation du cadre) et posturaux (ceux liés à l'inclinaison de la tête) est discutée, puisqu'elle apparaît de façon récurrente dans la littérature sans toutefois être résolue. Enfin, l'importance pour l'orientation spatiale du traitement des informations visuelles en mouvement dans le référentiel céphalocentré est mise en exergue.

2. Expérience 1 : Effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la verticale subjective lors d'inclinaisons de la tête

Manuscrit soumis à publication :

MARS, F., VERCHER, J.L. & BLOUIN, J. (soumis). Perception of the vertical with a head-mounted visual frame. Experimental Brain Research

Les effets combinés des perturbations visuelles et posturales sur la perception de la verticale ont souvent été étudiés en plaçant des sujets inclinés face à un cadre incliné ou à un disque en rotation. Dans la grande majorité des expériences, les effets induits par les stimulations visuelles sont nettement plus importants lorsque la tête est inclinée par rapport à la gravité que lorsqu'elle est maintenue droite (Dichgans et al., 1974 ; Witkin et Asch, 1948). Le débat est encore ouvert pour savoir si l'augmentation de la désorientation relève d'une addition des effets posturaux et des effets visuels ou si les deux effets sont interdépendants. Selon le modèle additif, l'erreur due à l'inclinaison de la tête ou du corps entier s'ajouterait intégralement aux erreurs provoquées par la perturbation visuelle. Autrement dit, la réponse fournie par le sujet lorsque les deux perturbations sont combinées serait le résultat de l'addition vectorielle des deux verticales perçues dans les situations où une seule manipulation expérimentale est réalisée. Pour le modèle interdépendant, l'influence de la vision sur la perception de l'orientation spatiale est limitée par le rôle inhibiteur des utricules et des informations somatosensorielles lorsque ceux-ci ne détectent aucun changement dans l'information gravitaire. Lorsque la tête est inclinée, la fiabilité des afférences otolithiques diminuerait et, par conséquent, la pondération des différentes sources d'informations serait modifiée en faveur des afférences visuelles. Récemment, Guerraz et al. (1998b) ont examiné, dans le cadre d'un protocole à mesures répétées, la combinaison d'inclinaisons de la tête et de perturbations visuelles statiques (cadre incliné) ou dynamique (disque en rotation). Ils concluent que l'effet du disque sur la verticale subjective augmente bel et bien lorsque la tête est inclinée. En revanche, l'augmentation de l'effet cadre observée dans les mêmes conditions ne serait que la conséquence d'un effet postural de type Aubert, ce qui contredit les conclusions de DiLorenzo et Rock (1982). La raison pour laquelle des opinions contradictoires existent encore à ce sujet tient probablement au fait que les

études mentionnées utilisent des amplitudes différentes d'inclinaison de la tête et du cadre. Par conséquent, confronter les études et en tirer des conclusions générales restent très difficiles. C'est pourquoi l'étude de la combinaison des perturbations visuelles et posturales sur un large continuum d'inclinaisons aiderait sans aucun doute à clarifier ce point.

Le premier objectif de l'expérience 1 vise précisément à décrire les effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la verticale visuelle, et ceci pour l'ensemble des inclinaisons possibles de la tête. L'influence de l'inclinaison de la tête en l'absence de référence visuelle, ainsi que l'influence d'un cadre visuel incliné, fixe dans l'espace et sans inclinaison de tête, sont également évaluées dans des conditions très similaires. La méthode utilisée se distingue de celles employées dans les études antérieures en ce qu'elle permet un positionnement libre de la tête à des inclinaisons variées en amplitudes. L'orientation de la tête et son maintien ne dépendent donc pas des dispositifs assez contraignants habituellement utilisés. De plus, la verticale visuelle est estimée pour un grand nombre d'amplitudes d'inclinaisons du cadre et / ou de la tête. Les analyses de régression effectuées sur ces valeurs permettent d'obtenir des fonctions psychométriques précises. Dans ces conditions, il sera possible de déterminer si les effets d'un cadre fixe par rapport à la tête lors d'inclinaisons de la tête peuvent s'expliquer par l'addition d'un effet cadre et d'un effet postural ou, dans le cas contraire, de préciser quelle est la nature des pondérations sensorielles mises en jeu dans ces conditions. Afin d'évaluer l'influence potentielle de la commande motrice associée à la production volontaire d'inclinaisons de la tête, l'expérience compare également les estimations obtenues de la verticale à la suite de mouvements actifs et passifs de la tête.

Le second objectif de l'expérience consiste à évaluer l'influence de la vision continue ou discontinue des cadres visuels lors de leurs changements d'orientation. L'orientation du cadre solidaire de la tête ne peut être évaluée que sur la base des signaux de position de la tête, puisque son orientation ne change jamais par rapport au segment céphalique. En d'autres mots, les transformations de coordonnées visuelles dans le référentiel céphalocentré sont inexistantes. Au contraire, lorsque l'orientation du cadre est dissociée de celle de la tête, toute rotation peut être référée à la tête. Ainsi, quand le sujet a la possibilité de garder les yeux ouverts pendant la rotation, les variations d'orientation du cadre par rapport à la tête peuvent être prises en compte en conjonction avec les signaux vestibulaires et proprioceptifs qui renseignent sur l'orientation de la tête dans l'espace. Nous faisons donc l'hypothèse que la vision du cadre lors de ses rotations dans l'espace ne diminuera les effets observés sur la verticale visuelle que lorsque l'orientation du cadre sera dissociée de celle de la tête.

2.1. Méthodes

2.1.1. Sujets

Douze sujets, 9 hommes et 3 femmes, âgés de 23 à 41 ans, se sont portés volontaires pour cette expérience. Aucun sujet n'a déclaré souffrir ou avoir souffert de troubles vestibulaires. Leur vision était normale ou normalement corrigée. Tous ont passé le test standard du cadre et de la baguette, effectué avec le dispositif portable d'Oltman (1968). Ce test est classiquement utilisé pour quantifier la dépendance/indépendance à l'égard du champ des sujets, c'est-à-dire leur plus ou moins grande dépendance à l'égard des informations visuelles pour estimer la verticale. Le cadre était incliné de 18° , la valeur connue pour induire des effets maximaux avec ce dispositif. Les sujets ont commis une erreur moyenne de $3,7^\circ$ ($\sigma = 1,8^\circ$) dans la direction du cadre, un score similaire à ce qui est rapporté dans d'autres expériences menées sur un grand corps de sujets non-sélectionnés (Oltman, 1968).

2.1.2. Matériel

L'expérience a été réalisée dans l'obscurité, à l'intérieur d'une pièce sans fenêtre et dont les murs étaient peints en noir. Les sujets étaient assis sur un ancien siège de coiffure adapté aux besoins de l'expérience. La baguette lumineuse utilisée pour les estimations de la verticale était générée selon les conditions expérimentales soit sur un moniteur informatique de 17", soit sur un casque vidéo (Glasstron → PLM-S700 commercialisé par Sony : Fig. 27).

Le casque vidéo donne la sensation de voir un écran informatique, centré sur l'axe interoculaire, d'une taille angulaire de 30° (largeur) par $22,5^\circ$ (hauteur). Le casque pèse 120 g et permet l'ajustement de la couleur, de la luminosité et du contraste. L'image est générée sur deux petits écrans à cristaux liquide (un pour chaque œil) qui ne fournissent aucun indice binoculaire (la même image est affichée sur les deux écrans). L'écran virtuel apparaît comme un rectangle gris foncé sur un arrière plan totalement noir. Ce contraste de luminosité forme donc un contour perçu par les sujets comme un cadre visuel. La résolution maximale du casque, soit 800×600 pixels, a été utilisée grâce à une connexion SVGA. Une pièce de néoprène a été ajoutée autour du casque afin de supprimer toute information visuelle périphérique. Un récepteur

magnétique, élément du système d'enregistrement Polhemus Fastrak (3Space Devices), était fixé sur le haut du crâne, pour mesurer l'orientation de la tête et du casque.



Fig 27 : Le casque vidéo Glasstron[®] PLM-S700 commercialisé par Sony

Le moniteur 17" était fixé à la hauteur du regard sur une plate-forme qui pouvait être inclinée manuellement dans le plan frontal. Un récepteur magnétique était collé sur le moniteur afin d'enregistrer son orientation. A la distance d'observation utilisée (60 cm), les bords de chacun des pixels n'étaient pas distinguables. En revanche, les contours de l'écran formé par l'ensemble des pixels formaient un cadre rectangulaire lumineux. Afin d'ajuster au mieux la distance entre le sujet et l'écran, le casque vidéo décrit précédemment était superposé à l'écran du moniteur (le casque était utilisé dans ce cas en mode dit «see through», qui permet de superposer l'écran virtuel au monde extérieur visible). Le rapport hauteur x largeur de l'écran du moniteur était également réglé de cette façon. Ces précautions permettaient de s'assurer de l'équivalence en terme d'angle visuel ($30^\circ \times 22,5^\circ$) entre les contours de l'écran lumineux fourni par le moniteur informatique et ceux de l'écran virtuel généré par le casque vidéo. Lorsque le moniteur était utilisé, le sujet portait une paire de lunettes de soleil en combinaison avec des lunettes protectrices fermées sur les côtés. De cette façon, seuls les contours du cadre et la barre lumineuse étaient visibles dans un environnement totalement noir par ailleurs. Un panneau noir, percé en son centre d'un orifice circulaire de 15° d'angle, était disposé devant le moniteur lorsque les références visuelles orientées fournies par le

contour de l'écran devaient être supprimées (voir procédure). Dans ce cas, la baguette apparaissait au centre de la fenêtre circulaire.

La baguette visuelle, de couleur blanche, était de forme oblongue, d'une longueur de 10° d'angle et d'une largeur de 2° en son milieu. Cette forme a été choisie afin de ne pas offrir la possibilité aux sujets d'utiliser l'alignement vertical des pixels comme indice de l'orientation de la baguette, une stratégie réalisable avec un objet aux contours linéaires. La baguette pouvait tourner autour de son axe central dans les sens horaire et anti-horaire en agissant sur une manette de jeux placée sur l'accoudoir droit du siège.

2.1.3. Procédure

Tous les sujets ont participé à 8 conditions expérimentales. Dans chacune d'elles, la tâche était de placer la baguette lumineuse à la verticale, définie dans les instructions comme la direction de la gravité, parallèle aux murs d'une pièce, à un arbre ou à une personne debout. Les sujets avaient pour instruction de réaliser la tâche de façon intuitive, sans chercher à adopter de stratégie particulière. Liberté était donnée de réaliser tous les ajustements nécessaires jusqu'à ce qu'une orientation satisfaisante soit atteinte. A ce moment, un appui sur la gâchette de la manette validait l'essai, faisait disparaître la baguette de l'écran et déclenchait l'enregistrement de l'orientation de la baguette, de la tête et/ou de l'écran en fonction de la condition expérimentale. Aucune limite temporelle n'était fixée pour estimer la verticale. Cependant, les consignes insistant sur la nécessité d'effectuer la tâche en première impression, rares ont été les ajustements excédant 5 secondes. A chaque nouvel essai, l'orientation initiale de la baguette était déterminée de façon aléatoire par le programme. Chaque condition expérimentale comportait 40 essais.

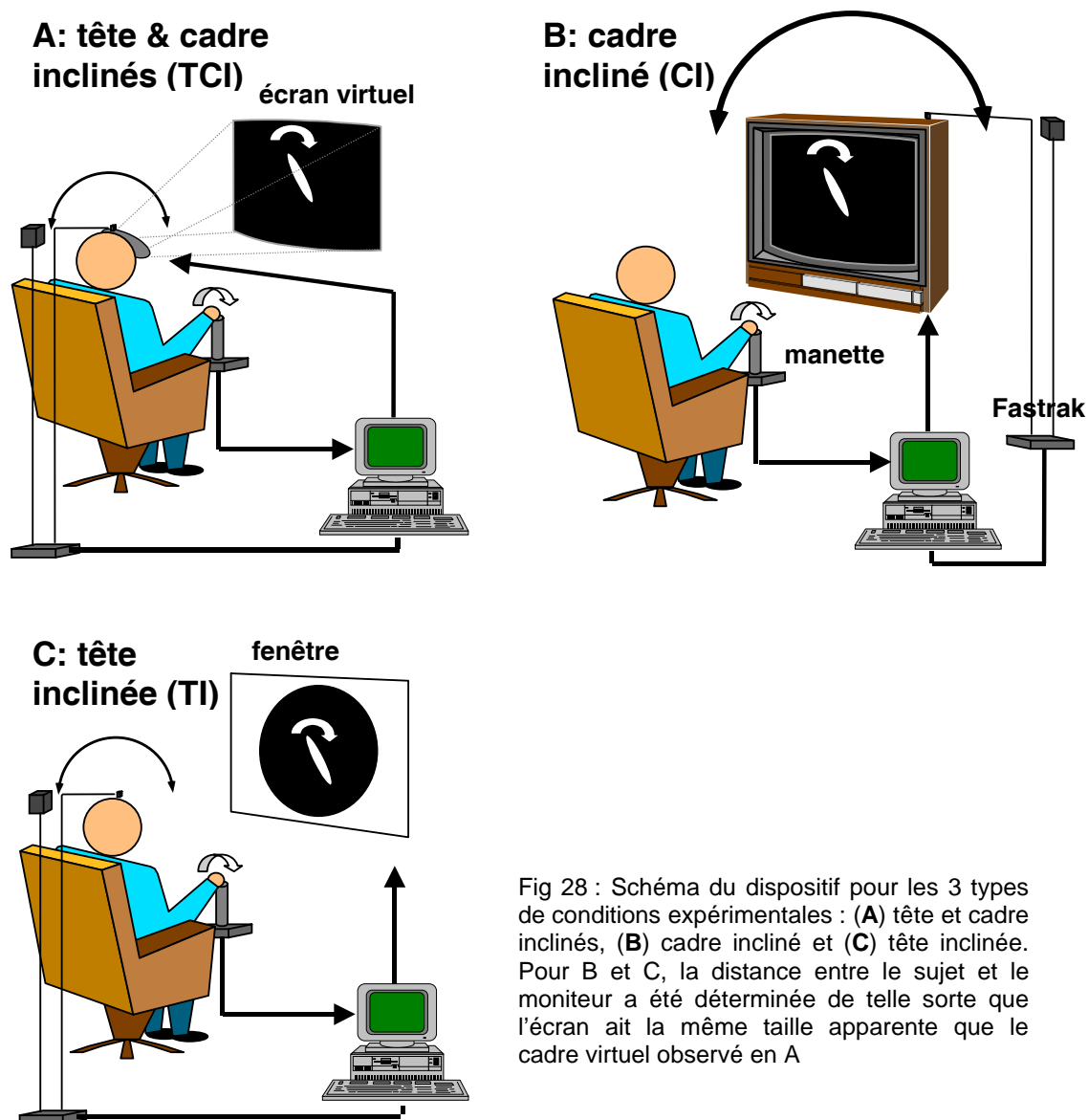


Fig 28 : Schéma du dispositif pour les 3 types de conditions expérimentales : (A) tête et cadre inclinés, (B) cadre incliné et (C) tête inclinée. Pour B et C, la distance entre le sujet et le moniteur a été déterminée de telle sorte que l'écran ait la même taille apparente que le cadre virtuel observé en A

2.1.3.1. Conditions «tête et cadre inclinés» (TCI)

Les sujets, équipés du casque vidéo, plaçaient leur tête à diverses orientations dans le plan frontal (Fig. 28A). Le cadre virtuel et la tête étaient donc inclinés de façon identique par rapport à la gravité. Le premier essai était toujours réalisé avec la tête droite. Ensuite, une nouvelle orientation de la tête était choisie et maintenue le temps d'estimer la verticale. Immédiatement après la validation de la mesure, une nouvelle posture de la tête était adoptée. De cette façon, les essais s'enchaînaient sans que les phases de maintien statique de la tête ne durent plus de temps que celui nécessaire à l'ajustement de la baguette lumineuse.

Quatre conditions TCI ont été réalisées. Dans deux d'entre elles, les sujets bougeaient la tête volontairement et choisissaient eux-mêmes l'amplitude de l'inclinaison. Auparavant, ils avaient été entraînés à exécuter des mouvements d'inclinaison de la tête, en étant attentifs à n'y associer ni rotation de la tête vers la droite ou vers la gauche, ni mouvement des épaules ou du tronc. Par conséquent, les inclinaisons de plus de 40° n'étaient pas demandées. Les sujets avaient pour instruction d'explorer l'ensemble des inclinaisons possibles de la tête, dans un ordre pseudo-aléatoire au cours des 40 essais. Dans les deux conditions TCI restantes, la tête était inclinée d'une orientation à une autre par l'expérimentateur. Les sujets avaient pour consigne de ne pas résister au mouvement imposé par l'expérimentateur et, à l'opposé, de ne pas accompagner le mouvement. L'expérimentateur a pris soin de reproduire aussi adéquatement que possible les caractéristiques (vitesse, accélération) d'un mouvement naturel. Pour chaque type de mouvement (actif et passif), deux conditions ont été réalisées. Dans l'une d'elle, les sujets fermaient les yeux pendant le mouvement alors que dans l'autre, ils voyaient le cadre tout en bougeant.

2.1.3.2. Conditions «cadre incliné» (CI)

Deux conditions CI ont été réalisées. Cette fois, la tête était maintenue droite par une sorte de minerve. L'expérimentateur changeait l'orientation du cadre en agissant sur la plate-forme inclinable (Fig. 28B). Chaque nouvelle orientation était choisie au hasard entre 40° dans le sens anti-horaire et 40° dans le sens horaire. Dans l'une des conditions, les sujets avaient pour consigne de fermer les yeux entre les essais afin de ne pas disposer de la vision du cadre lorsque celui-ci était en rotation. Dans l'autre condition, la vision continue du cadre était permise.

2.1.3.3. Conditions «tête inclinée» (TI)

De la même manière que durant les conditions TCI, les sujets avaient pour instruction de positionner leur tête dans 40 orientations différentes et d'estimer la verticale pour chacune des positions (Fig. 28C). La baguette était affichée sur l'écran utilisé dans les conditions CI, placé à la même distance, et dont les contours étaient masqués par le panneau noir. La baguette apparaissait dans la fenêtre circulaire percée au centre du panneau.

2.1.4. Analyse des données

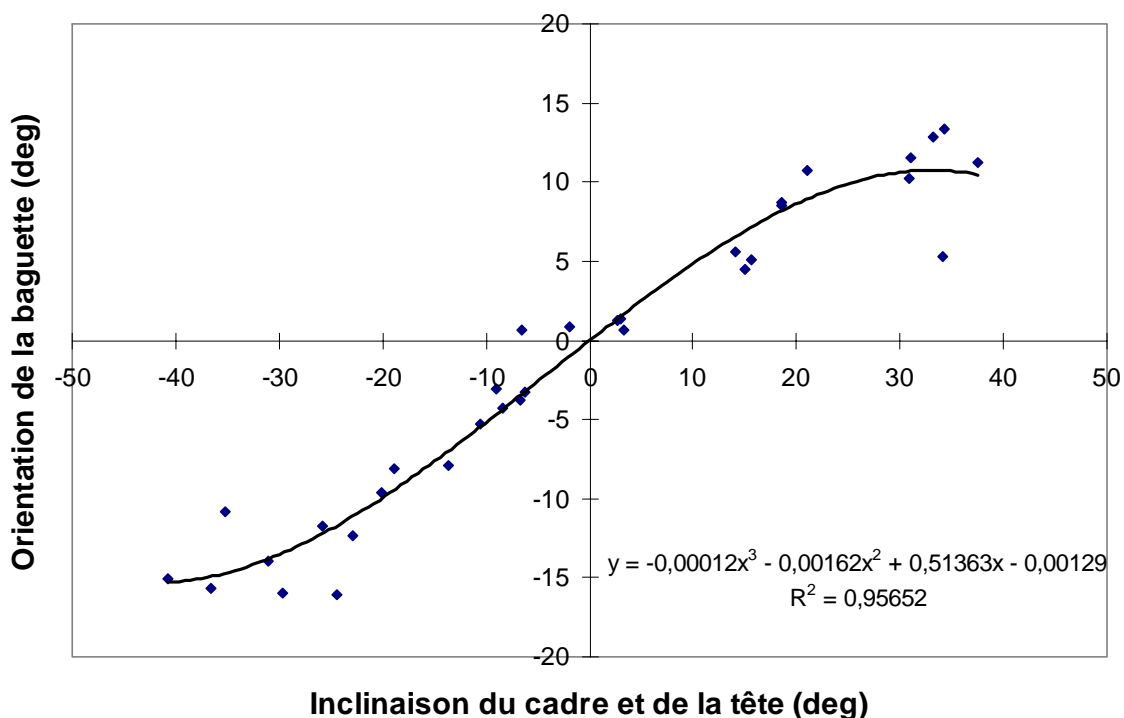


Fig. 29 : Courbe de réponse typique d'un sujet dans une des conditions TCI. Les réponses obtenues à chaque essai sont représentées, ainsi que la courbe de régression (polynôme de 3^{ème} ordre). L'équation correspondant à la courbe de régression et le coefficient de détermination R^2 sont indiqués.

Par convention, une inclinaison de la tête ou une erreur dans l'estimation de la verticale se voit assigner une valeur positive si elle est dans le sens horaire et négative si elle est dans le sens anti-horaire. La figure 29 montre les réponses données par un sujet dans l'une des conditions TCI. Cet exemple est représentatif du caractère non-linéaire des comportements observés dans cette expérience, quelle que soit la condition expérimentale. En effet, les erreurs commises en estimant la verticale étaient, pour la plus grande partie des sujets, une fonction linéaire de l'inclinaison de la tête et/ou du cadre pour atteindre un maximum vers 25° d'inclinaison ou plus. Pour des inclinaisons supérieures, l'erreur cessait d'augmenter, voire diminuait. D'autres sujets, au contraire,

présentaient des réponses purement linéaires¹. Cette variabilité interindividuelle est présente dans toutes les conditions expérimentales. Par conséquent, afin de résumer au mieux toutes les données individuelles avec la même méthode, nous avons réalisé des régressions polynomiales de 3^{ème} ordre. De cette façon, chaque courbe de réponse peut être modélisée par l'équation suivante :

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d,$$

où y est l'estimation prédite de la verticale et x l'orientation de la tête et/ou du cadre. La significativité statistique de chacun des paramètres peut alors être calculée (module «estimations non-linéaires» de Statistica). La composante de 3^{ème} ordre de l'équation (a) reflète la tendance du sujet à commettre une erreur maximale avant d'atteindre l'inclinaison maximale de la tête et/ou du cadre. Le second paramètre (b) teste l'asymétrie de la courbe. Le troisième (c) est la pente de la courbe à l'origine. Enfin, la constante (d) représente l'erreur commise par le sujet lorsque sa tête était droite.

Puisque toutes les courbes de réponses pouvaient être résumées en grande partie par leur composante linéaire, la pente des courbes à l'origine est la valeur pertinente pour estimer la force de l'effet (erreur constante). De plus, l'erreur variable a été évaluée en calculant la moyenne des résidus absolus (les valeurs absolues des différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites pour un même angle d'inclinaison).

¹ Dans d'autres études utilisant des cadres carrés, l'influence du degré d'inclinaison du cadre sur la verticale subjective est décrite comme une fonction sinusoïdale avec une erreur maximale se situant aux alentours de 20° d'inclinaison (Goodenough et al., 1985 ; Zoccolotti et al., 1992). Les auteurs appliquent par conséquent des analyses de Fourier et décrivent l'effet cadre comme l'amplitude de la sinusoïde qui s'applique le mieux aux données. La forme des fonctions obtenues dans ces études peut s'expliquer par les propriétés géométriques d'un carré. En effet, lorsqu'un carré est incliné de plus de 22,5°, il devient une figure ambiguë qui peut être perçue comme inclinée dans un sens ou dans l'autre. En fait, une des diagonales du cadre est plus proche de la verticale réelle que ses contours et peut devenir pour les sujets une référence importante influençant leurs jugements d'orientation. Lichtenstein et Saucer (1974, cité dans Goodenough et al., 1985), ont travaillé avec un cadre rectangulaire et ont obtenu des courbes de réponse similaires à celles que nous avons observées.

2.2. Résultats

2.2.1. Analyses individuelles

Toutes les conditions expérimentales ont généré une variabilité interindividuelle importante, une caractéristique très souvent retrouvée dans les études portant sur la verticale subjective. Dans les conditions TCI, le paramètre de 3^{ème} ordre de la régression est significatif pour 6 sujets parmi 12, ce qui signifie que les erreurs maximales d'estimation de la verticale sont obtenues pour des inclinaisons de la tête inférieures à 40°. En moyenne, cette erreur maximale s'élève à $-5,8^\circ$ pour des inclinaisons de tête de $-30,4^\circ$, et à $6,4^\circ$ pour des inclinaisons de tête de $27,9^\circ$. Quatre autres sujets montrent une augmentation linéaire des erreurs jusqu'à des inclinaisons de tête de 40°. L'erreur atteint alors $-11,9^\circ$ pour des inclinaisons de tête dans le sens anti-horaire et $12,2^\circ$ pour des inclinaisons dans le sens horaire. En fait, ces quatre sujets sont parmi les cinq sujets les plus répondeurs, c'est-à-dire ceux présentant les pentes à l'origine les plus fortes. Les deux sujets restants ne sont pas affectés de façon significative par le traitement expérimental.

Dans les conditions CI, 7 sujets atteignent une erreur maximale de $-3,2^\circ$ pour des inclinaisons du cadre de $-25,8^\circ$ et de $3,8^\circ$ pour des inclinaisons du cadre de $25,7^\circ$. Trois autres sujets montrent une augmentation linéaire des erreurs jusqu'à ce qu'elles atteignent en moyenne $-3,2^\circ$ pour des inclinaisons du cadre dans le sens anti-horaire et $1,9^\circ$ pour des inclinaisons dans le sens horaire. Les deux sujets restants ne sont pas influencés de façon significative par le cadre incliné.

Dans les conditions TI, 5 sujets commettent des erreurs significatives dans la direction de l'inclinaison de la tête (effet Aubert). Trois sujets présentent des erreurs inversées (effet Müller) et 4 sujets n'ont pas commis d'erreurs significatives dans un sens ou dans l'autre.

2.2.2. Analyses globales

Les jugements de la verticale ont des profils superposables, que les mouvements de tête aient été réalisés activement ou passivement. Cette observation est valable dans les conditions TCI ($t_{11} = 0,90$ avec les yeux ouverts et $t_{11} = 0,64$ avec les yeux ouverts) et dans les conditions TI ($t_{11} = 0,10$). Par conséquent, les données ont été moyennées et les analyses ultérieures ont été réalisées sur ces moyennes. La figure 30 présente les

courbes de réponses moyennes obtenues dans l'ensemble des conditions. Chaque courbe a été obtenue en moyennant les valeurs prédites par les modèles appliqués à chaque sujet, ceci sur toute l'étendue des orientations étudiées et avec un pas de 2° . On observe que, dans les conditions TCI, l'erreur d'estimation de la verticale correspond à 29% et 28% de l'inclinaison de la tête et du cadre, respectivement lorsque les yeux sont ouverts et fermés. Dans les conditions CI, l'erreur de 17% commise avec les yeux fermés chute à 8% lorsque les sujets ont la possibilité d'observer les rotations du cadre visuel. Enfin, incliner la tête en l'absence de référence visuelle ne produit qu'un très léger effet Müller (inclinaison de la verticale visuelle dans le sens opposé à l'inclinaison de la tête), non-significatif.

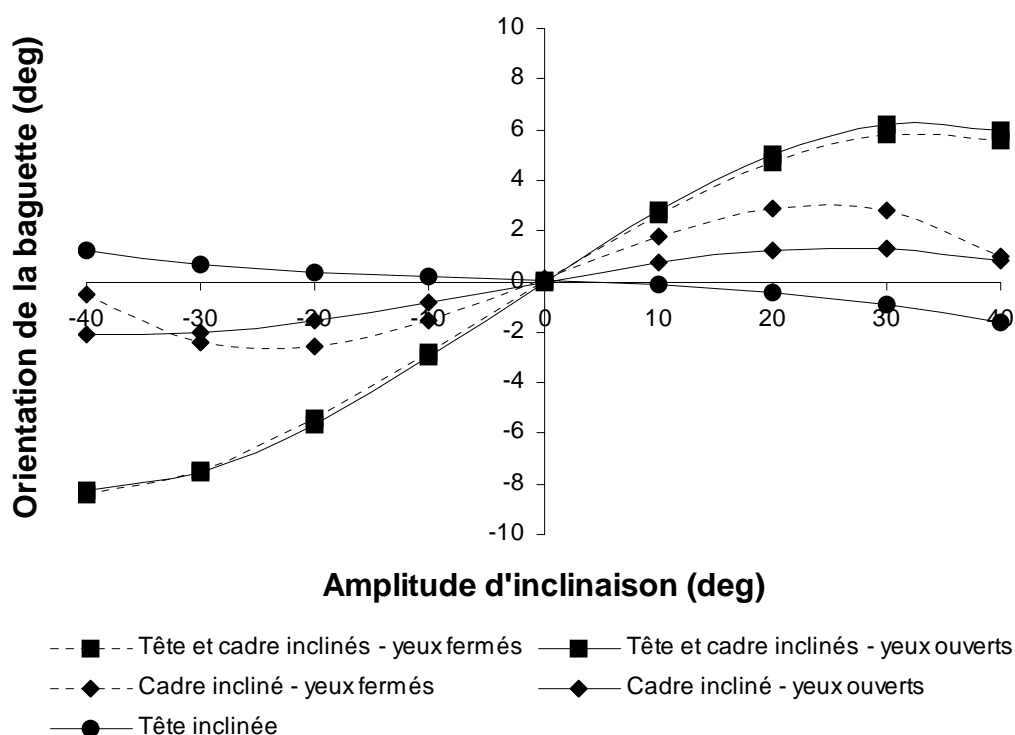


Fig. 30 : Estimation moyenne de la verticale (en degrés, 0° correspondant à la verticale gravitaire) en fonction de l'angle d'inclinaison dans toutes les conditions. Les courbes correspondent à la moyenne des réponses prédites pour chaque sujet, calculées à partir des régressions polynomiales illustrées par la figure 29.

Une analyse de variance à mesures répétées 2 (cadre fixe par rapport à la tête vs. cadre dissocié de la tête) x 2 (yeux fermés vs. yeux ouverts) réalisée sur les pentes des courbes met en évidence un effet principal du type de cadre [$F(1,11) = 5,96$; $p < .05$], une absence d'effet principal de la vision du cadre pendant la rotation [$F(1,11) = 4,15$]

et une interaction significative entre les deux variables [$F(1,11) = 12,76$; $p < .005$]. Les analyses post-hoc (tests de Newman-Keuls) révèlent que l'interaction est la conséquence d'un effet significatif de la vision continue du cadre dans les conditions CI (la pente est plus forte avec les yeux fermés, $p < .001$), mais pas dans les conditions TCI [$p > .50$, Fig. 31].

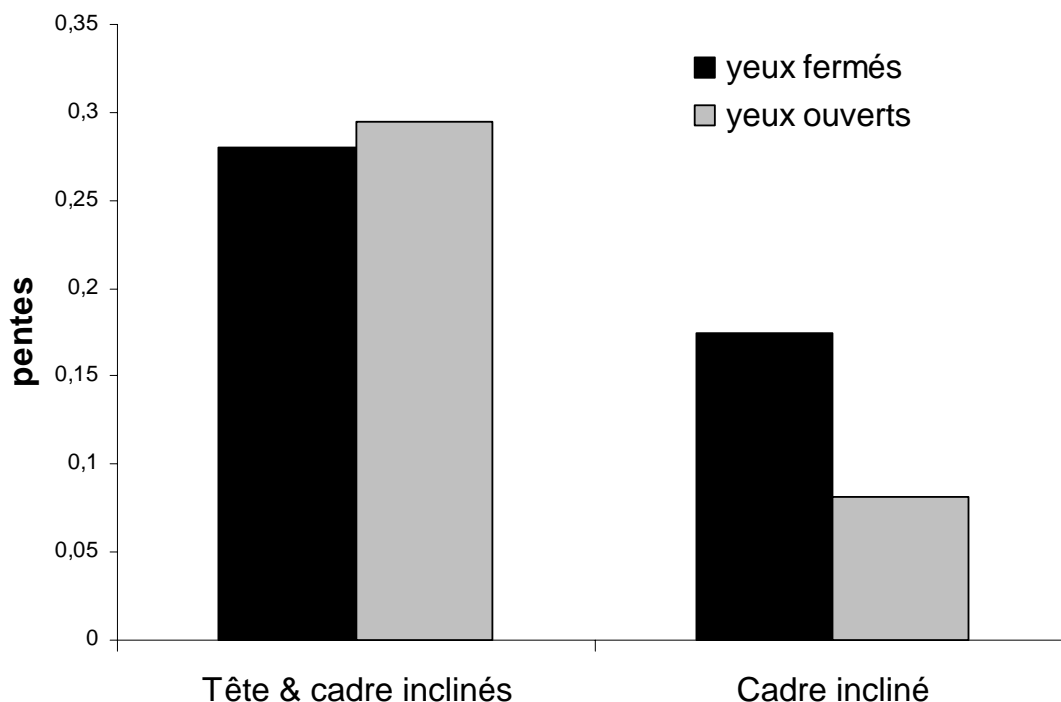


Fig. 31 : Effets sur la verticale subjective de la vision du cadre durant ses changements d'orientation dans les conditions TCI et CI.

Les erreurs commises dans les conditions TCI sont plus grandes que la somme des erreurs obtenues dans les conditions CI et dans les conditions TI (Fig. 32). Cet effet est significatif avec les yeux fermés pendant le mouvement ($t_{11} = 2,96$; $p < .05$) et encore plus avec les yeux ouverts ($t_{11} = 6,65$; $p < .001$).

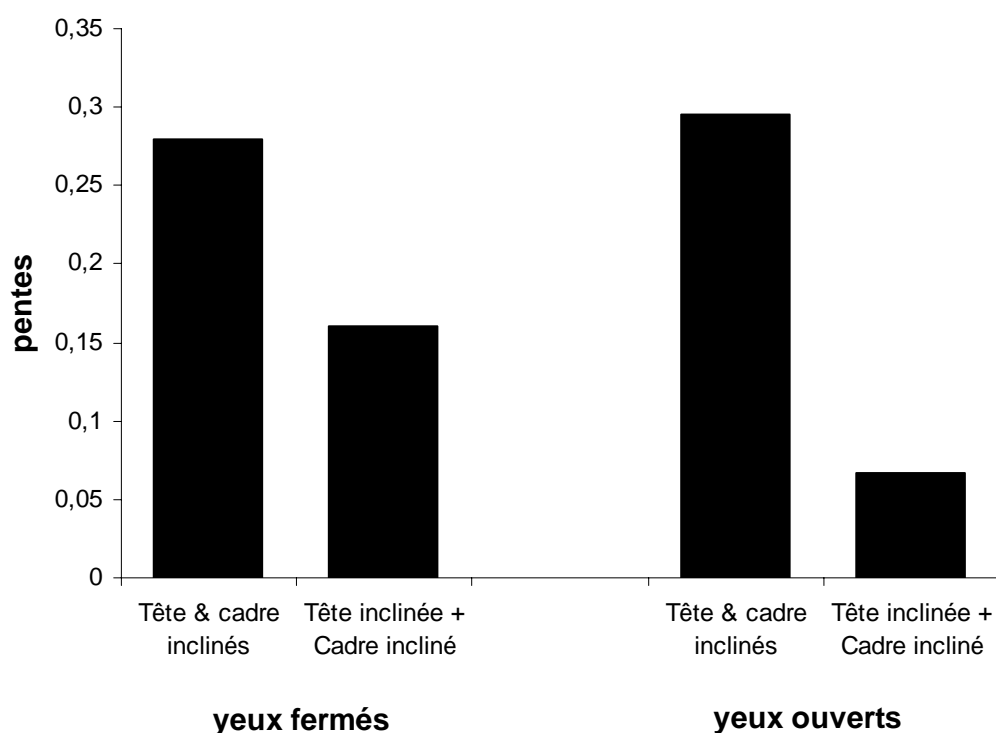


Fig 32 : Pentes moyennes des courbes de réponses obtenues dans les conditions TCI comparées à la somme des effets obtenus dans les conditions TI et CI.

Les corrélations entre conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 1. Les erreurs obtenues dans les conditions TCI sont significativement corrélées avec toutes les autres conditions. Seule la corrélation entre TCI-yeux fermés et CI-yeux ouverts fait exception. En revanche, les conditions CI et TI ne sont pas significativement corrélées.

	TCI yeux fermés	TCI Yeux ouverts	CI Yeux fermés	CI yeux ouverts	TI
TCI yeux fermés	1.00	.98 ***	.59 *	.57 ns	.85 ***
TCI yeux ouverts		1.00	.65 *	.67 *	.72 ***
CI yeux fermés			1.00	.76 **	.36 ns
CI yeux ouverts				1.00	.49 ns
TI					1.00

Tableau 1 : Coefficients de Bravais-Pearson entre toutes les conditions expérimentales. ^{ns} non-significatif, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Les résidus absolus moyens diffèrent selon les conditions expérimentales [$F(2,22) = 9,99$; $p < .001$]. Les analyses post-hoc révèlent que la variabilité intraindividuelle est plus faible dans les conditions CI que dans les conditions TCI ($p < .001$) et que dans les conditions TI ($p < .01$). La différence entre les deux dernières conditions n'atteint pas le niveau de significativité ($p < .15$). Aucune autre manipulation expérimentale (yeux fermés/yeux ouverts, mouvements actifs/mouvements passifs) n'a d'effet significatif sur la variabilité de la réponse. La figure 33 décrit les résidus absolus moyens en fonction de l'inclinaison. Lorsque la tête est droite (conditions CI), les résidus restent presque constants, quelle que soit l'orientation du cadre. Au contraire, la variabilité augmente avec le degré d'inclinaison de la tête. Ce profile est frappant, particulièrement lorsque l'inclinaison de la tête est combinée avec un cadre visuel incliné (conditions TCI).

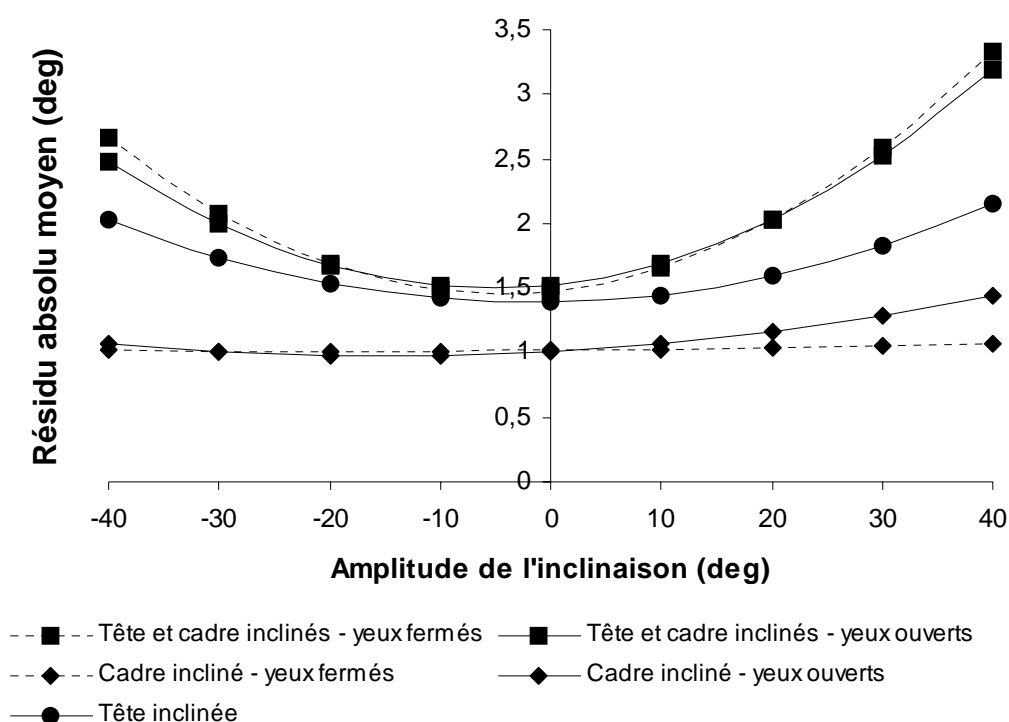


Fig. 33 : Distribution des résidus absolus moyens (variabilité de la réponse) en fonction de l'inclinaison dans toutes les conditions. Les valeurs absolues des différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites par la régression ont été calculées pour chaque sujet puis moyennées.

2.3. Discussion

L'expérience 1 s'intéresse aux effets d'un cadre visuel solidaire de la tête sur la verticale visuelle lorsque la tête est inclinée. Les effets d'une telle combinaison d'informations ont été comparés aux effets simples de l'inclinaison d'un cadre fixe dans l'espace et à ceux de l'inclinaison de la tête en l'absence de références visuelles orientées. Les inclinaisons du cadre et/ou de la tête ont été variées de façon systématique afin de pouvoir décrire précisément la forme des fonctions psychométriques résultantes. Deux résultats principaux peuvent être mis en avant. Premièrement, les erreurs dans l'estimation de la verticale sont nettement plus grandes lorsqu'un cadre visuel s'incline avec la tête que lors d'inclinaisons similaires d'un cadre fixe dans l'espace sans inclinaison de tête. L'augmentation de l'effet du cadre visuel ne peut pas être expliqué par l'addition d'un effet postural, puisque incliner la tête en l'absence de références visuelles n'influence pas, en moyenne, l'estimation de la verticale faite par les sujets. Deuxièmement, la vision continue du cadre lors de ses changements d'orientation n'améliore la performance des sujets que lorsque la tête et le cadre sont dissociés, c'est-à-dire avec un cadre fixe dans l'espace.

2.3.1. Réfutation de l'hypothèse d'additivité des effets visuels et posturaux

Les études précédentes cherchant à déterminer si les effets visuels et posturaux sur la verticale subjective s'additionnent sont parvenues à des conclusions différentes (DiLorenzo et Rock, 1982 ; Guerraz et al., 1998b). Guerraz et collaborateurs, en particulier, suggèrent que l'augmentation de l'effet cadre, obtenue lorsque la tête est inclinée, est la conséquence de l'addition du simple effet d'incliner la tête. Les résultats de notre expérience ne soutiennent pas une telle hypothèse d'additivité. L'absence de concordance entre nos résultats et ceux de Guerraz et collaborateurs peut s'expliquer par des différences méthodologiques. En effets, Guerraz et collaborateurs estiment l'effet de l'inclinaison de la tête et du cadre pour une seule orientation contrainte de la tête (28°), alors que celle-ci est variée de façon systématique dans notre expérience. De plus, on peut noter que les sujets de Guerraz et collaborateurs ont montré un net effet Aubert (erreurs dans le sens de l'inclinaison de la tête) en l'absence de cadre visuel. Les effets posturaux et visuels évalués indépendamment vont donc dans le même sens, ce qui rend la situation favorable à la conclusion d'un effet additif lorsque les deux perturbations sont combinées. D'un point de vue plus général, il est difficile d'envisager la fusion des

informations sensorielles provenant de différentes sources comme relevant d'une simple sommation. En effet, il existe la plupart du temps de grandes différences dans les caractéristiques spatiales et temporelles des systèmes sensoriels (Howard, 1997). Les modèles actuels essaient d'ailleurs d'expliquer l'intégration d'afférences sensorielles multiples en terme de combinaisons non-linéaires (Mergner et al., 1997, 1998). Au mieux, l'intégration multisensorielle peut être décrite approximativement par une moyenne pondérée des afférences sensorielles (pour une revue récente et détaillée, voir Jeka et al., 2000). En fonction des conditions, une modalité sensorielle peut prévaloir sur une autre ou, au contraire, voir son influence diminuer. Plus spécifiquement, les signaux de position de la tête semblent n'être fiables que lorsqu'ils sont intégrés au travers de processus dynamiques (Teasdale et al., 1999). Par conséquent, lorsque la tête est inclinée et maintenue dans une orientation donnée, l'augmentation des erreurs dans la direction du cadre incliné reflète probablement un poids plus important affecté aux références visuelles.

2.3.2. La désorientation spatiale : un phénomène à deux visages

L'étude de la variabilité de la réponse des sujets suggère également une fiabilité moindre des signaux de position de la tête lorsque celle-ci est inclinée. La variabilité intraindividuelle est faible lorsque la tête est droite, quelle que soit l'orientation du cadre visuel. En revanche, la variabilité est plus grande dès lors que la tête est inclinée et elle s'accroît avec l'amplitude d'inclinaison, que les références visuelles soient absentes ou fixes par rapport à la tête. Il est intéressant de remarquer que cette observation quantitative correspond aux commentaires des sujets, qui ont exprimé une plus grande difficulté à réaliser la tâche lorsque la tête était inclinée, en particulier en combinaison avec le cadre visuel. Dans ces dernières conditions, les sujets ont d'ailleurs souvent rapporté un fort sentiment d'incertitude quant à la précision de leurs ajustements. Ces résultats mettent l'accent sur le fait que la désorientation spatiale peut être définie de deux façons différentes. D'une part, l'erreur constante par rapport à la verticale gravitaire témoigne du résultat perceptif élaboré par le système nerveux central, en fonction des informations dont il dispose. En l'occurrence, lorsque le cerveau doit s'accommoder d'informations appauvries ou conflictuelles, la perception peut être biaisée en faveur d'une modalité sensorielle ou d'une autre. D'autre part, on peut considérer l'erreur variable qui atteste du niveau de reproductibilité de la réponse du sujet. En ce qui concerne les estimations subjectives, cette reproductibilité reflète

souvent le niveau de confiance du sujet dans sa réponse. Dans ce cas, désorientation spatiale n'est pas nécessairement synonyme d'altération de performance moyenne. Nos résultats illustrent cette distinction. En effet, le biais perceptif atteint un plateau et décroît parfois (Fig. 30), alors que la variabilité (et sa contrepartie subjective) continue à augmenter avec l'amplitude de l'inclinaison de la tête (Fig. 33).

2.3.3. Traitement de l'information visuelle en mouvement dans le référentiel céphalocentré

Lorsqu'un cadre visuel solidaire des mouvements de la tête est porté par le sujet, la vision continue du cadre durant les inclinaisons n'améliore pas la performance finale. Dans ce cas, le système nerveux central doit composer avec des informations visuelles orientées, à la fois stables dans le référentiel céphalocentré et mobiles dans le référentiel gravitaire. En fait, l'orientation du cadre ne peut alors être appréciée que par le biais des signaux de position de la tête, c'est-à-dire grâce à l'information vestibulaire et à la proprioception du cou. La commande motrice ne semble avoir aucune influence puisque les résultats sont identiques, que les mouvements de tête soient effectués activement ou passivement. Les résultats obtenus avec le cadre solidaire de la tête contrastent nettement avec l'amélioration des jugements de verticalité apportée par la vision continue d'un cadre ancré dans l'espace extracorporel. Cette condition expérimentale se rapproche des conditions naturelles où la scène visuelle bouge dans le référentiel céphalocentré dès lors que la tête bouge ou que les éléments de l'environnement changent de position ou d'orientation. Le fait que le traitement continu de l'information visuelle ne réduise les erreurs que lorsque la tête et le cadre sont dissociés suggèrent que les indices visuels de mouvement doivent être intégrés dans le référentiel céphalocentré pour qu'ils puissent participer à la constance de l'orientation spatiale.

On pourrait objecter que des informations visuelles fixes par rapport à la tête existent bel et bien dans des conditions normales de vie, sous la forme de montures de lunettes ou de casque par exemple. Cela est vrai, mais de tels cadres ne sont pas des stimuli visuels saillants qui peuvent influencer la perception de la verticalité. De plus, les lunettes et les casques sont en contact rapproché avec le corps. Par conséquent, il est possible de s'y adapter avec l'expérience en les incorporant dans son schéma corporel, qui sous-tend entre autres la connaissance implicite que nous avons des délimitations de notre propre corps (Gallagher et Cole, 1995 ; Graziano et al., 2000). Au contraire, un cadre visuel virtuel tel que celui que nous avons étudié, projeté dans l'espace extra-

personnel, est un stimulus puissant au-delà duquel il est difficile de passer outre sans repère contradictoire, lorsque des jugements de verticalité doivent être effectués dans l'obscurité.

3. Expérience 2 : Effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la réorientation de la tête et la verticale subjective lors d'inclinaisons corporelles

Résultats présentés en tant que communication affichée :

Mars, F., Bringoux, L., Cian, C., Raphel, C. & Vercher, J. L. (2001). Perception of the vertical with head-centered and body-centered visual frames during whole-body tilt. International symposium on neural control of space coding and action perception. 22-24 Mars 2001, Lyon (France).

L'expérience 1 a mis en évidence le fait que la vision continue de la rotation d'un cadre visuel limite les effets de celui-ci sur la verticale subjective. Autrement dit, l'effet cadre peut être réduit de façon significative si les indices visuels de mouvement du cadre sont disponibles entre deux inclinaisons statiques. Cette affirmation n'est valable que si les rotations s'effectuent dans le référentiel céphalocentré. Si, au contraire, le cadre visuel est asservi à l'orientation de la tête, la vision continue du cadre n'apporte aucune amélioration à l'estimation de la verticale. L'hypothèse selon laquelle le codage des informations visuelles dynamiques dans le référentiel céphalocentré contribue de façon cruciale à la perception de l'orientation spatiale peut donc être avancée.

L'expérience 2 poursuit l'investigation de cette hypothèse, en s'intéressant cette fois à l'estimation de la verticale lorsque le corps entier du sujet est incliné dans le plan frontal, en présence soit d'un cadre solidaire de l'inclinaison du corps, soit d'un cadre solidaire des mouvements de la tête. Dans les deux cas, le sujet est assis dans un siège monté sur une plate-forme inclinable en roulis. Le cadre solidaire du corps est fourni par les contours d'un écran, fixé sur la plate-forme à hauteur des yeux du sujet. Le cadre solidaire de la tête est fourni par le casque vidéo utilisé dans l'expérience 1. Lorsque l'orientation de la tête est maintenue dans l'alignement du tronc, les deux conditions sont strictement identiques, quelle que soit l'orientation du corps par rapport à la gravité. En revanche, lorsque la tête est mobile, notre hypothèse prédit deux effets opposés selon le type de cadre visuel. En effet, si le cadre visuel est solidaire de la plate-forme, c'est-à-dire lorsqu'il s'incline avec le corps du sujet tout en restant dissocié de la tête, le mouvement de la tête produit un déplacement du cadre relativement au référentiel

céphalocentré. Selon notre hypothèse, l'information visuelle dynamique qui est générée devrait contribuer à diminuer l'influence du cadre sur la verticale subjective. En revanche, lorsque le cadre visuel est solidaire des mouvements de la tête, bouger la tête provoque un mouvement du cadre dans le référentiel gravitaire, mais aucune variation de l'orientation du cadre dans le référentiel céphalocentré. Dans cette condition, loin d'améliorer la performance des sujets, les mouvements de la tête et du cadre visuel dans l'espace risquent de désorienter d'avantage le sujet.

Au-delà des effets imputables à la présence ou à l'absence d'informations visuelles en mouvement dans le référentiel céphalocentré, l'expérience 2 étudie l'influence des deux types de cadres visuels sur le positionnement de la tête et ses conséquences sur la perception de la verticale. A cette fin, il est demandé au sujet de repositionner sa tête dans l'alignement du tronc après avoir effectué une série de mouvements céphaliques, puis, une fois la posture adoptée, d'estimer la verticale. Là encore, on peut supposer un effet différencié des deux types de cadres visuels. En effet, certains travaux montrent que des références visuelles orientées peuvent influencer sur la posture céphalique. Un cadre visuel incliné, par exemple, induit une réorientation de la tête dans la direction de l'inclinaison du cadre (Guerraz et al., 2001 ; Isableu et al., 1997 ; Sares et al., résultats non publiés). Le système nerveux central utiliserait donc l'information visuelle statique disponible dans l'environnement pour réorienter la partie supérieure du corps, avec très certainement pour finalité de faire de la tête un référentiel spatial stable et orienté adéquatement pour la perception du monde visuel (Amblard et al., 1985 ; Gresty et Bronstein, 1992).

Dans l'expérience décrite ici, le sujet a pour tâche de réorienter sa tête dans l'alignement du tronc. Or, le cadre visuel solidaire de la plate-forme et l'axe céphalocaudal du sujet (axe Z) sont colinéaires. Par conséquent, il est fort probable que, dans cette condition, les sujets tirent avantage de la présence du cadre pour mener à bien la tâche de réorientation de la tête. En revanche, le cadre visuel solidaire de la tête n'a pas d'ancrage dans l'espace extra-corporel. Son orientation ne peut être évaluée qu'à partir des signaux de position de la tête. L'information visuelle est donc présente, mais non-utilisable pour réorienter la tête. On peut donc faire l'hypothèse que le repositionnement de la tête donnera lieu à des erreurs plus importantes dans cette condition. Il semble difficile en revanche de prédire si ces erreurs seront systématiquement dirigées dans une direction ou dans une autre. Quoi qu'il en soit, toute erreur de repositionnement risque d'avoir des conséquences sur l'estimation de la

verticale. En effet, le cadre étant solidaire de la tête, son inclinaison dans l'espace sera modifiée de la même amplitude que l'erreur de repositionnement de la tête. L'expérience 2 vise donc à (1) quantifier les éventuelles erreurs de repositionnement de la tête en présence ou en l'absence de références visuelles ancrées dans l'espace extra-personnel, et (2) déterminer dans quelle mesure ces erreurs interagissent avec les références visuelles pour influencer la perception de la verticale.

Pour répondre aux questions qui viennent d'être posées, les influences de trois facteurs expérimentaux sur la verticale subjective et sur une tâche de réorientation de la tête vont être étudiées. Premièrement, le corps des sujets sera incliné dans le plan frontal à des amplitudes et dans des directions variées. Deuxièmement, la mobilité de la tête sera contrainte dans l'alignement du tronc ou maintenue activement comme telle par les sujets. Troisièmement, un cadre fournissant des références visuelles d'orientation sera ancré soit sur la tête des sujets, soit dans l'espace extra-corporel. Les effets de l'inclinaison du corps en l'absence de références visuelles orientées seront également observés en soumettant les sujets aux mêmes conditions expérimentales, mais sans la présence d'un cadre visuel orienté.

3.1. Méthodes

3.1.1. *Sujets*

Les résultats de 6 hommes et 3 femmes ont été retenus pour cette expérience. Aucun sujet n'a déclaré souffrir ou avoir souffert de troubles vestibulaires. Leur vision était normale ou normalement corrigée. Deux autres sujets ayant également participé ont été exclus de l'étude, et ce pour des raisons diamétralement opposées. Le premier, une gymnaste pratiquant le trampoline, a montré une capacité à indiquer presque parfaitement la verticale, quelles que soient les conditions expérimentales. Son expertise dans le domaine de l'orientation spatiale en faisait un sujet hors norme. Le second, au contraire, a constamment aligné la baguette à ajuster sur les bords du cadre visuel. La raison réside dans ce cas soit dans une incompréhension des consignes, soit dans une dépendance à l'égard du champ particulièrement élevée.

3.1.2. Matériel

Les sujets étaient assis dans un siège baquet fixé sur une plate-forme verticale (Fig. 34). La plate-forme pouvait être inclinée dans le plan frontal autour d'un axe de rotation situé approximativement au niveau du centre de masse du sujet. Le moteur permettant l'inclinaison de la plate-forme était contrôlé à distance par ordinateur. Les sujets étaient fermement maintenus immobiles dans le siège par un ensemble de sangles au niveau des pieds, des jambes, du bassin, de la poitrine et des épaules. Seuls les avant-bras du sujet gardaient leur mobilité. La tête pouvait également être maintenue dans l'alignement du tronc, lorsque les conditions expérimentales l'exigeaient, grâce à deux presses appuyant sur les tempes.

La baguette visuelle utilisée pour indiquer la verticale était la même que celle de l'expérience 1. Son orientation était là aussi contrôlée à l'aide d'une manette de jeux que les sujets maintenaient à deux mains sur leurs cuisses. La baguette était présentée soit dans le casque vidéo utilisé dans l'expérience précédente (Fig. 27, cf. § 2.1.2), lequel présentait un écran virtuel dont les contours fournissaient un cadre solidaire des mouvements de la tête, soit sur un écran de 12", placé à 45 cm en face de la tête du sujet, et solidaire des mouvements de la plate-forme (Fig. 34). Les cadres visuels formés par les bords des chaque écran avaient une taille angulaire de 30° (largeur) par $22,5^\circ$ (hauteur). Lorsque l'écran fixé à la plate-forme était utilisé, le sujet portait une paire de lunettes de soleil en combinaison avec des lunettes protectrices fermées sur les côtés. De cette façon, seuls les contours de l'écran et la barre lumineuse étaient visibles dans un environnement totalement noir par ailleurs. Un panneau noir, percé en son centre d'un orifice circulaire de 15° d'angle, était disposé devant l'écran lorsque les références visuelles orientées, fournies par les contours, devaient être supprimées.

Un dispositif magnétique Fastrak mesurait l'orientation de la tête par rapport au tronc. L'émetteur était fixé sur la plate-forme à la droite du sujet et un récepteur était attaché à un casque ajustable, porté par le sujet.

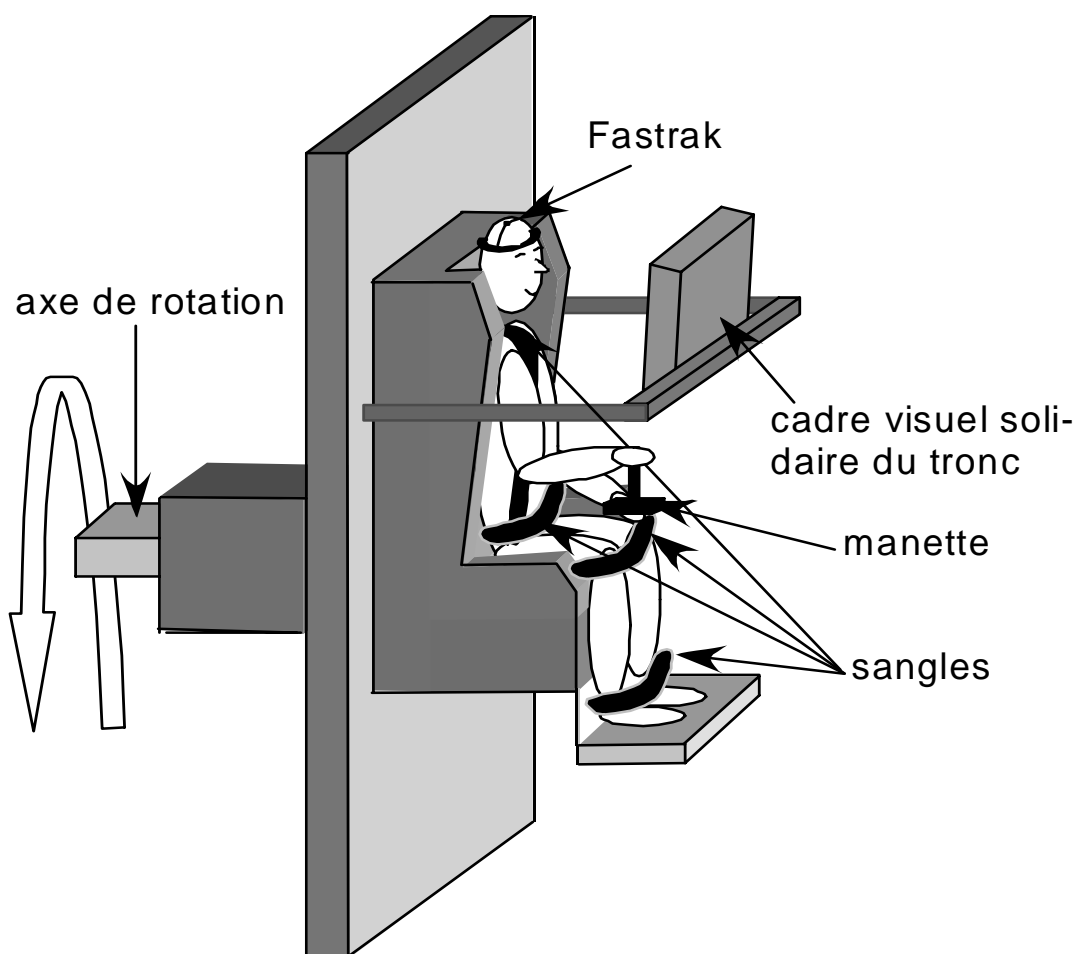


Fig. 34 : Schéma du dispositif expérimental dans la condition «CSP tête mobile». Le moniteur, dont les contours fournissent le cadre visuel, est disposé à une distance où sa taille angulaire est équivalente à celle du cadre virtuel utilisé dans les conditions CST. Dans les conditions «tête fixe», la tête est maintenue immobile dans l'axe du corps par deux presses latérales.

3.1.3. Procédure

Les sujets ont participé à une seule session expérimentale qui a duré une heure et demie. Trois variables ont été manipulées dans un protocole à mesures répétées. La première variable était l'inclinaison du corps par rapport à la verticale, la deuxième le type de cadre visuel et la troisième la condition de mobilité de la tête. Dans chacune des conditions issues du croisement de ces trois variables, la tâche du sujet comprenait l'ajustement de la baguette lumineuse à la verticale. Les instructions données aux sujets (définition de la notion de verticale, demande de réponse intuitive, procédure à suivre) étaient identiques à celles de l'expérience 1. Quinze secondes après avoir atteint une inclinaison donnée, le sujet effectuait consécutivement 3 ajustements à la verticale. L'orientation initiale de la baguette était déterminée de façon aléatoire par le programme. Au moment de la validation de l'essai par un appui sur la gâchette de la

manette, l'orientation de la baguette par rapport à l'axe vertical de l'écran et l'orientation de la tête par rapport au tronc étaient enregistrées simultanément. L'orientation de la tête était mesurée dans toutes les conditions expérimentales, y compris celles où la tête était immobilisée. Cette précaution permettait de s'assurer de la bonne immobilisation du sujet dans le siège, tout au long de l'expérience.

3.1.3.1. Inclinaisons du corps

Le corps des sujets a été incliné avec la plate-forme à 15° et 30° dans le plan frontal, dans le sens horaire et dans le sens anti-horaire. Les inclinaisons s'effectuaient avec une accélération initiale de $3^\circ.s^{-2}$, jusqu'à une vitesse de $3^\circ.s^{-1}$. Cette vitesse était maintenue constante jusqu'à la phase de décélération, elle aussi effectuée à $3^\circ.s^{-2}$. Ces paramètres ont été choisis pour que les inclinaisons soit clairement perceptibles, sans toutefois être trop rapides, ce qui aurait provoqué des effets importants sur la verticale visuelle dus à une forte stimulation des canaux semi-circulaires. Durant la rotation, les sujets avaient pour consigne de garder les yeux ouverts et de regarder le cadre visuel. Des valeurs de références ont été enregistrées avant chaque séquence d'inclinaisons, lorsque la plate-forme était verticale. L'ordre des inclinaisons qui suivaient ne pouvant pas être totalement contrebalancé, étant donné l'effectif des sujets, dix combinaisons différentes d'inclinaisons ont été définies et affectées aléatoirement à chacune des 6 séquences expérimentales résultant du croisement des deux autres variables indépendantes. De cette façon, l'ordre de présentation des inclinaisons variait systématiquement en fonction des conditions et des sujets.

3.1.3.2. Type de cadre visuel

La baguette visuelle apparaissait au centre de trois types de cadre visuel, dont l'ordre de présentation a été contrebalancé. Le casque vidéo fournissait un cadre solidaire de la tête (conditions CST). L'axe vertical du cadre visuel restait donc constamment aligné sur l'axe vertical de la tête, quelle que soit l'orientation de celle-ci. Les contours de l'écran fixé à la plate-forme fournissaient un cadre visuel solidaire de la plate-forme (conditions CSP). L'axe vertical du cadre restait cette fois constamment aligné avec l'axe vertical du corps du sujet (axe Z). Une fenêtre circulaire entourant la baguette formait un cadre visuel non-orienté (conditions CNO).

3.1.3.3. Mobilité de la tête

Dans la moitié des conditions expérimentales, la tête du sujet était maintenue dans l'alignement du buste par les presses latérales. Pendant les quinze secondes séparant la fin de la rotation et l'estimation de la verticale, le sujet avait pour instruction de regarder le cadre visuel. Dans l'autre moitié des conditions expérimentales, la tête du sujet était libre. Pendant et après les rotations, le sujet avait pour instruction de toujours garder la tête dans l'alignement du tronc. En revanche, avant d'estimer la verticale, il devait réaliser des mouvements libres de la tête pendant quelques secondes. Les mouvements devaient être effectués dans toutes les directions de l'espace, tout en gardant le regard dirigé vers le cadre visuel. Finalement, le sujet devait réorienter la tête de façon à la remettre dans l'alignement du buste et estimer la verticale.

3.1.3.4. Analyse des données

Les données enregistrées lors de la validation des essais étaient constituées de l'orientation de la baguette sur l'écran et de l'orientation de la tête sur le tronc. Dans les conditions CSP et CNO, l'écran était toujours incliné de façon identique à la plate-forme. L'orientation de la baguette par rapport à la verticale gravitaire était donc simplement calculée en ajoutant l'inclinaison de la plate-forme et l'orientation de la baguette par rapport à l'écran. Dans les conditions CST, le cadre visuel était solidaire de la tête. Toute inclinaison de la tête par rapport au tronc s'accompagnait par conséquent d'une inclinaison supplémentaire du cadre qui s'ajoutait à l'inclinaison de la plate-forme. L'orientation de la baguette par rapport à la verticale était donc obtenue en ajoutant l'inclinaison de la baguette sur l'écran, l'inclinaison de la tête sur le tronc et l'inclinaison de la plate-forme.

3.2. Résultats

La figure 35 montre les estimations de la verticale dans toutes les conditions expérimentales. Pour la clarté de l'illustration et pour mieux mettre en évidence la linéarité des effets en fonction de l'inclinaison du sujet, une erreur dans l'estimation de la verticale se voit assigner une valeur positive, si elle est dans le sens horaire, et négative, si elle est dans le sens anti-horaire. Pour les analyses statistiques, en revanche, les erreurs d'appréciation de la verticale sont positives si elles sont commises dans le sens de l'inclinaison du corps (et du cadre). Les valeurs de références obtenues dans chaque condition sans inclinaison corporelle ont été retranchées à ces données. Une ANOVA à mesures répétées a alors pu être réalisée selon le plan suivant : $S_9 * C_3 * T_2 * D_2 * A_2$, où S est le facteur sujet, C le type de cadre visuel, T la condition de mobilité de la tête, D la direction de l'inclinaison et A son amplitude.

En ce qui concerne les effets principaux, l'analyse révèle un effet significatif du type de cadre visuel [$F(2,16) = 15,96$; $p < .001$], pas d'effet de la mobilité de la tête [$F(1,8) = 0,43$], pas d'effet du côté d'inclinaison du corps [$F(1,8) = 5,15$] et un effet significatif de l'amplitude d'inclinaison [$F(1,8) = 37,73$; $p < .001$]. Parmi toutes les interactions possibles, une seule est significative. Il s'agit de l'interaction de premier ordre entre le type de cadre visuel et la mobilité de la tête [$F(2,16) = 4,72$; $p < .05$]. Les tests post-hoc de Newman-Keuls effectués sur cette interaction (résumée sur la figure 36) montrent que, dans la condition CST, les erreurs augmentent de façon significative lorsque la tête est en mouvement avant l'estimation de la verticale ($p < .05$). En revanche, la réduction des erreurs observées lorsque la tête est libre n'est significative ni dans la condition CSP, ni dans la condition CNO. Si l'on considère maintenant les erreurs d'estimation de la verticale en proportion de l'amplitude d'inclinaison de la plate-forme, on observe que les erreurs commises dans les conditions CSP «tête fixe» et «tête libre» correspondent respectivement à 26% et 20% de l'inclinaison de la plate-forme. L'erreur commise en CST «tête fixe» est équivalente, puisqu'elle atteint 22%. Cette proportion augmente à 34% en CST «tête libre».

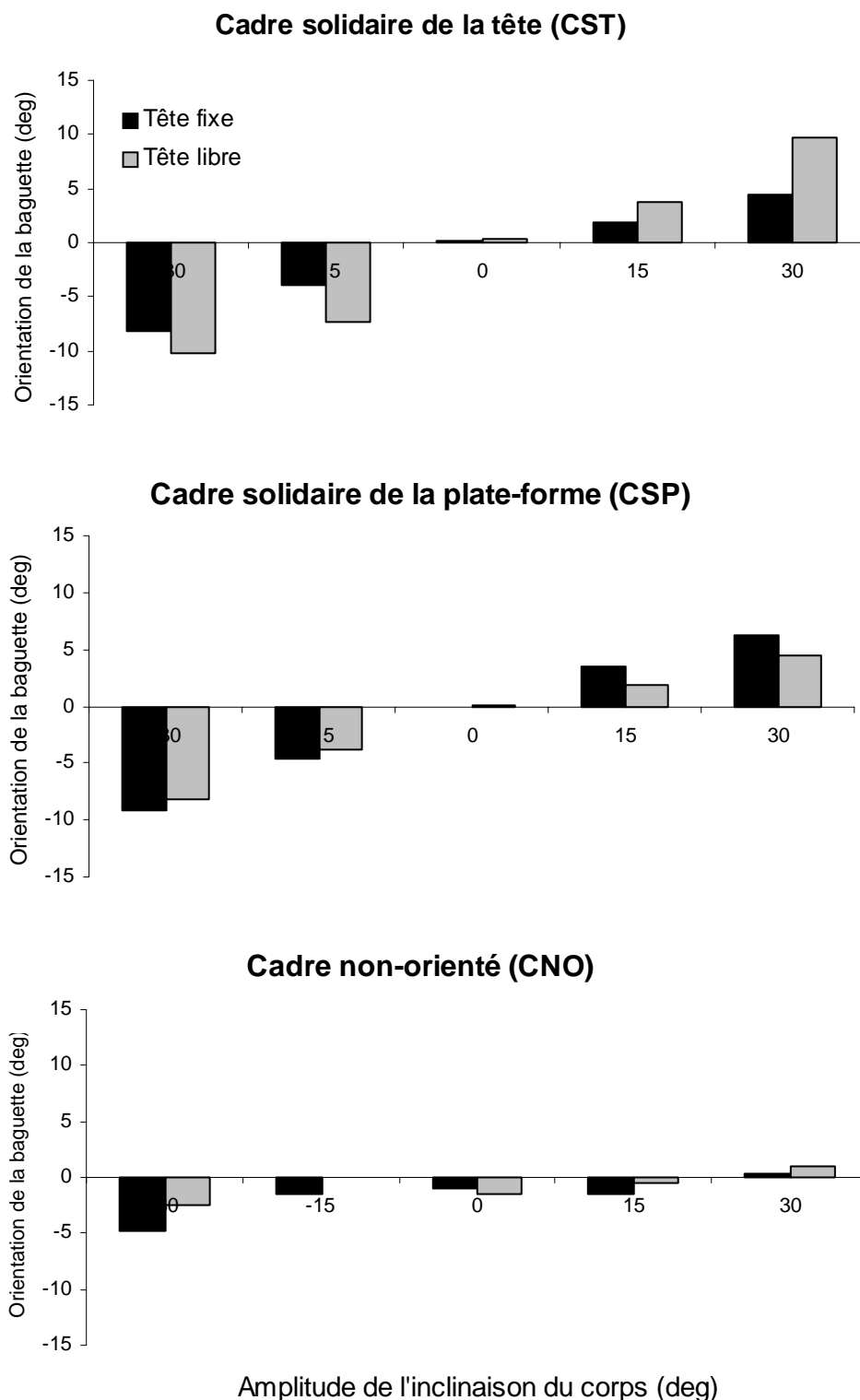


Fig. 35 : Estimation de la verticale en fonction de l'inclinaison du corps, du type de cadre visuel et de la mobilité de la tête. Dans la condition CST, bouger la tête avant l'estimation augmente l'erreur, commise en direction de l'inclinaison du corps et du cadre. Dans la condition CSP, la mobilité de la tête n'a pas d'effet significatif d'un point de vue statistique sur la verticale subjective. On peut cependant observer une légère amélioration de la performance pour toutes les inclinaisons lorsque le mouvement de la tête est permis.

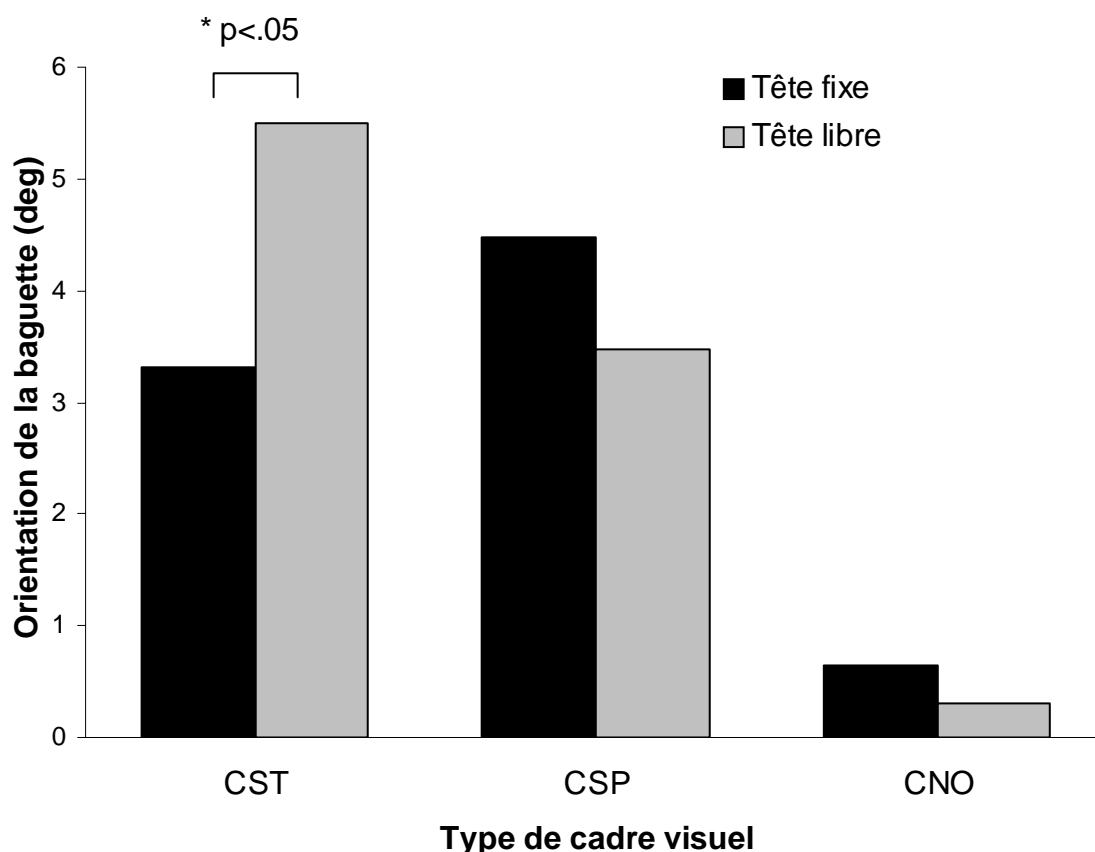


Fig. 36 : L'interaction significative entre le type de cadre visuel et la condition de mobilité de la tête sur la verticale subjective. Une erreur positive correspond à une erreur dans le sens de l'inclinaison du corps (et du cadre). Les tests post-hoc montrent que seule l'augmentation des erreurs dans la condition CST est significative.

Des analyses similaires ont été effectuées sur les erreurs de repositionnement de la tête. Bien entendu, seules les conditions où la tête était libre de bouger sont considérées cette fois. Les erreurs de repositionnement de la tête commises dans le sens de l'inclinaison de la plate-forme se voient attribuer une valeur positive, alors que les erreurs commises dans la direction opposée sont négatives. Les valeurs de référence obtenues sans inclinaison corporelle ont là aussi été retranchées aux données obtenues pendant les inclinaisons. Une ANOVA à mesures répétées a alors été réalisée selon le plan suivant : $S_9 * C_3 * D_2 * A_2$, où S est le facteur sujet, C le type de cadre visuel, D la direction de l'inclinaison et A son amplitude. Cette analyse ne montre aucun effet significatif. Les erreurs de repositionnement sont à la fois très faibles en moyenne et très variables selon les sujets. En fait, on peut mettre en évidence un effet du type de cadre visuel sur les erreurs de repositionnement de la tête en calculant l'erreur moyenne indépendamment de la direction et de l'amplitude de l'inclinaison du corps (Fig. 37) et

en comparant ces moyennes à zéro. Dans ce cas, seule l'erreur de repositionnement commise en condition CST est significativement déviée, en l'occurrence dans le sens de l'inclinaison de la plate-forme ($p < .05$). Une analyse descriptive plus détaillée des résultats individuels révèle que dans la condition CST, 7 des 9 sujets laissent tomber la tête à des degrés divers du côté de l'inclinaison du corps. Les deux sujets restants réussissent à maintenir leur tête approximativement dans l'alignement du tronc. La condition CSP donne lieu à la plus grande variabilité interindividuelle, puisque 4 sujets inclinent la tête dans la direction de l'inclinaison du corps, 2 sujets dans la direction opposée et 3 sujets réussissent à la maintenir correctement. Enfin, la condition CNO voit 5 sujets maintenir la tête dans le long de l'axe corporel (dont 4 avec une précision remarquable), 2 sujets commettre des erreurs dans un sens et les 2 sujets restants dans l'autre sens.

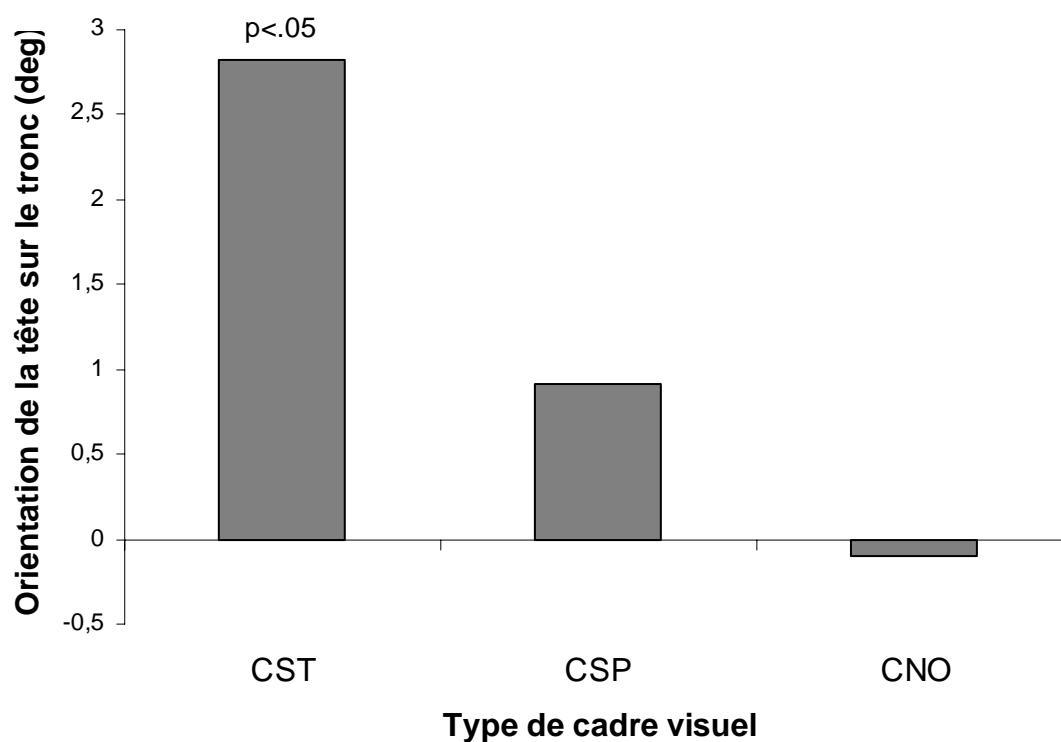
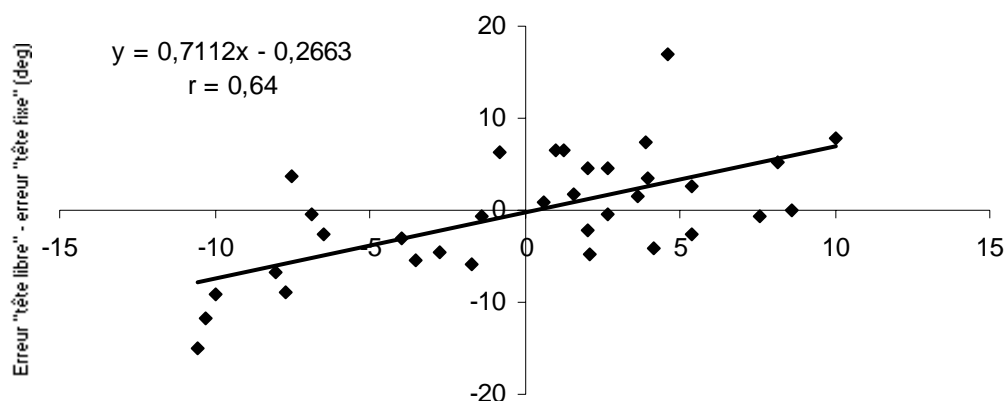
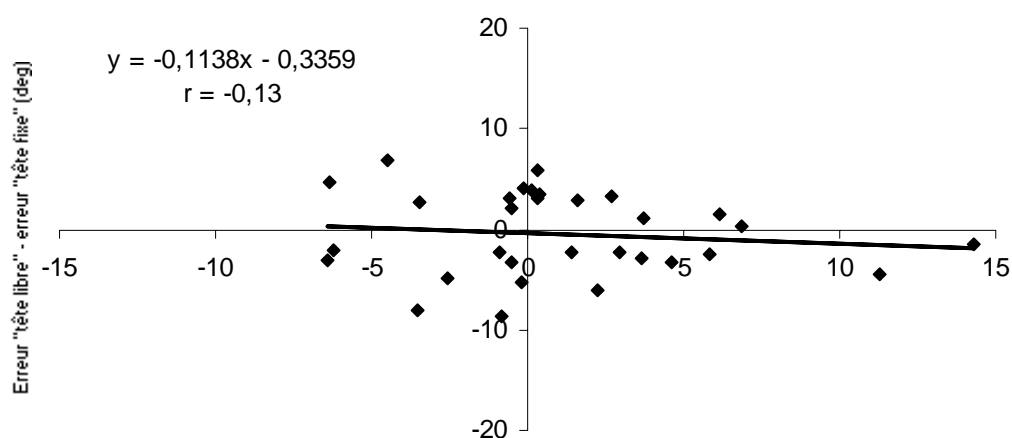


Fig. 37 : Erreur moyenne de repositionnement de la tête en fonction des trois types de cadres visuels étudiés. Une valeur positive représente une erreur dans le sens de l'inclinaison du corps. Seule l'erreur commise avec le cadre solide de la tête est significativement différente de zéro.

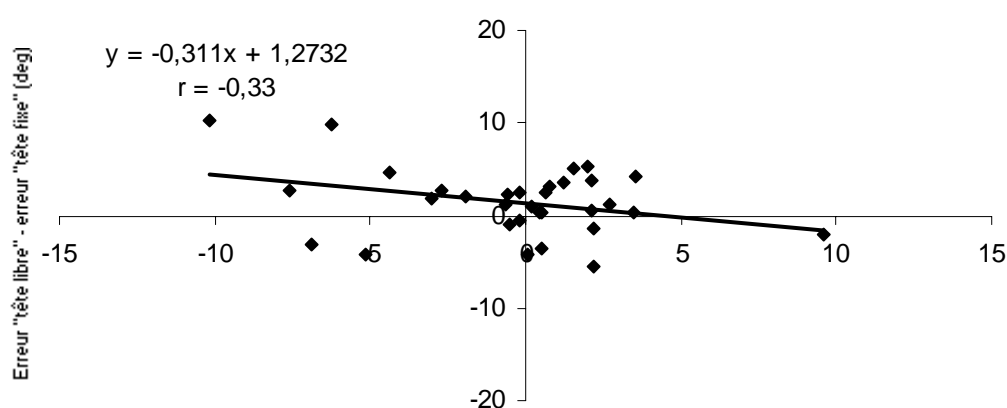
Cadre solidaire de la tête (CST)



Cadre solidaire de la plate-forme (CSP)



Cadre non-orienté (CNO)



Orientation de la tête sur le tronc (deg)

Fig. 38 : Différences d'estimation de la verticale entre les conditions «tête libre» et «tête fixe» en fonction des erreurs de repositionnement de la tête en condition «tête libre». La corrélation n'est significative que dans la condition CST. La régression montre que le supplément d'erreur obtenu lorsque la tête est libre correspond à 71% de l'erreur de repositionnement.

Les liens entre les erreurs de repositionnement de la tête et les erreurs d'estimation de la verticale peuvent être mis à jour en effectuant une série de corrélations linéaires. Ces corrélations ont consisté à mettre en rapport, d'une part, l'erreur de repositionnement de la tête dans les conditions «tête libre» et d'autre part, la différence entre les erreurs d'estimation de la verticale dans les conditions «tête libre» et celles observées dans les conditions «tête fixe» (Fig. 38). Elles montrent que les deux variables ne sont significativement corrélées que dans les conditions CST ($r = 0,64$, $p < .001$). La régression appliquée sur ces données révèle que l'erreur supplémentaire observée en CST-«tête libre» correspond à 70% de l'inclinaison de la tête.

3.3. Discussion

L'expérience 2 visait principalement à comparer les effets de deux types de cadres visuels lors d'inclinaison du corps dans le plan frontal, à la fois sur la perception de la verticale et sur le maintien de la tête dans l'alignement du tronc. L'un des cadres était solidaire de l'orientation de la tête, l'autre s'inclinait avec le corps du sujet, sans toutefois être asservi à la tête. Conformément aux hypothèses énoncées en introduction, lorsque la tête est mobile, un cadre visuel céphalocentré génère des erreurs supérieures dans l'estimation de la verticale. Le comportement des sujets dans la tâche de réorientation de la tête diffère également. Les sujets tendent en moyenne à repositionner leur tête dans l'alignement du tronc en présence de références visuelles ancrées dans l'environnement extérieur. Par contraste, la tête est inclinée dans la direction de l'orientation du corps, lorsque le cadre visuel est solidaire de la tête.

3.3.1. Ancrage des références visuelles et réorientation de la tête

La stabilisation de la tête dans l'espace aurait deux fonctions primordiales (Massion, 1994). D'une part, elle intervient comme un élément déterminant dans le contrôle postural et le maintien de l'équilibre et d'autre part, elle permet de fournir aux systèmes perceptifs un référentiel stable. Pour maintenir la tête droite, plusieurs sources d'informations sont utilisées. Premièrement, les indices vestibulaires commandent le réflexe vestibulo-collique, dont l'effet est de redresser la tête dès lors qu'elle n'est plus alignée avec la direction de la gravité. Deuxièmement, les informations proprioceptives issues des muscles du cou participent aux réflexes cervico-colliques qui tend à maintenir la tête dans l'alignement du tronc. On accorde habituellement une importance

moindre à la vision sur le maintien de l'orientation de la tête en condition normale, même s'il est reconnu qu'elle peut avoir une influence significative (Guitton et al., 1986).

Lorsque les références visuelles d'orientation ne sont pas alignées sur la verticale, l'influence de la vision peut être clairement mise en évidence par une réorientation de la tête dans la même direction (Guerraz et al., 2001 ; Isableu et al., 1997; Sares et al., résultats non publiés). Sares et al. (résultats non publiés) montrent en particulier que, dans un champ gravito-inertiel modifié, un cadre visuel incliné modifie considérablement le résultat de la compétition entre les réflexes vestibulo-colliques et cervico-colliques. Sur la base de l'ensemble de ces travaux, nous avons fait l'hypothèse qu'un cadre visuel incliné de la même amplitude que le corps améliorerait la performance des sujets dans une tâche consistant à réorienter la tête dans l'alignement du tronc, par rapport à une situation où les informations visuelles étaient solidaires de la tête. Les résultats confirment en partie seulement cette hypothèse. En effet, si la performance moyenne des sujets est meilleure en présence d'informations visuelles ancrées dans l'espace externe, la dispersion des données (selon l'axe des abscisses de la Fig. 38) témoigne d'une assez grande variabilité interindividuelle dans toutes les conditions. Les idiosyncrasies habituellement observées dans les situations expérimentales telles que la nôtre semblent donc se manifester dans la contribution des informations visuelles au choix des «stratégies» de stabilisation de la tête, un phénomène cohérent avec les travaux d'Amblard et al. (2001). En l'absence d'ancrage des informations visuelles dans l'environnement externe au sujet, le comportement de la tête est nettement plus consistant. En effet, les sujets, dans leur majorité, ont tendance à laisser la tête inclinée dans la direction de l'inclinaison du corps. Dans cette condition, les informations visuelles solidaires de la tête sont sans aucune pertinence pour la réalisation de la tâche. En fait, la performance des sujets peut être considérée comme le strict résultat de la modulation volontaire de la compétition entre les réflexes cervico-colliques et vestibulo-colliques. Les premiers vont dans le sens d'une performance adéquate dans la tâche demandée. Les seconds doivent être inhibés pour éviter un redressement de la tête. Visiblement, dans les conditions expérimentales décrites ici, le réflexe vestibulo-collique est sur-compensé.

3.3.2. *Ancrage des références visuelles et verticale subjective*

Avec un cadre solidaire de la tête, l'estimation de la verticale faite par les sujets après la tâche de réorientation de la tête est significativement plus déviée dans le sens de l'inclinaison du cadre qu'avec un cadre dissocié de la tête. La question se pose alors de savoir quels facteurs peuvent expliquer cette augmentation des erreurs, puisque deux phénomènes coexistent dans cette condition. En effet, le cadre visuel étant solidaire de l'orientation de la tête, les mouvements précédant l'estimation de la verticale ne génèrent aucune variation de l'orientation du cadre dans le référentiel céphalocentré, contrairement à l'autre condition. De plus, si on considère les observations précédentes, il apparaît que les sujets tendent en moyenne à incliner la tête dans la même direction que le corps. Le cadre est donc lui-même incliné par rapport à la gravité d'une amplitude supplémentaire équivalente à celle de la tête.

Les corrélations représentées par la figure 38 ont été réalisées dans le but de déterminer dans quelle proportion cette inclinaison supplémentaire du cadre et de la tête peut expliquer l'augmentation de l'erreur dans l'estimation de la verticale. Alors que les erreurs de repositionnement de la tête ne présentent aucun lien avec les erreurs sur la verticale subjective lorsque le cadre est dissocié de la tête, la corrélation est clairement positive lorsque le cadre est solidaire de la tête. Elle montre que l'augmentation des erreurs observée entre les conditions «tête fixe» et «tête libre» correspond à 70% de l'inclinaison de la tête. Cette proportion est particulièrement élevée au regard des résultats obtenus dans l'expérience 1 où les effets de l'inclinaison de la tête par rapport au corps ont été étudiés. Rappelons que les erreurs observées sur la verticale subjective correspondaient alors à moins de 30% de l'inclinaison de la tête. L'inclinaison supplémentaire du cadre et de la tête dans l'espace peut donc expliquer, au mieux, la moitié de l'erreur supplémentaire observée dans l'expérience 2.

Une autre explication pourrait être avancée. Elle consisterait à dire que l'erreur de réorientation de la tête ne serait pas accessible au système perceptif et viendrait s'ajouter à l'erreur provoquée par l'inclinaison du cadre. En effet, le sujet ayant explicitement pour tâche de réorienter sa tête dans l'alignement du tronc, on peut faire l'hypothèse que l'erreur de repositionnement est la conséquence d'une perception erronée de la tête. L'orientation du cadre céphalocentré étant, par définition, dépendante de la position perçue de la tête, les erreurs perceptives s'ajouteraient. Cependant, la logique de cette éventualité voudrait que l'erreur de repositionnement s'ajoute

intégralement à l'erreur observée lorsque la tête est maintenue dans l'alignement du tronc par le dispositif de contention. Ce n'est pas le cas, ce qui nous amène à rejeter cette hypothèse.

Les résultats plaident donc en faveur de l'hypothèse, posée *a priori*, selon laquelle les mouvements de la tête provoquent un conflit informationnel, puisque le cadre visuel change d'orientation dans le référentiel gravitaire tout en restant fixe dans le référentiel céphalocentré. L'augmentation de l'erreur observée ici serait donc une autre démonstration de l'importance cruciale du traitement des informations spatiales relativement à la tête. Cette hypothèse prédisait également une diminution de l'effet cadre lorsque la tête était mobile en face d'un cadre indépendant de la tête. Cette diminution, quoique présente d'un point de vue descriptif pour toutes les orientations du corps, n'est pas significative. En fait, une telle diminution de l'erreur a été retrouvée chez 5 sujets. Un sujet n'a pas été affecté par la mobilité de la tête. Les 3 sujets restants ont montré, au contraire, une augmentation de l'erreur d'estimation de la verticale dans le sens de l'inclinaison du cadre. Il apparaît donc que l'intégration du mouvement des références visuelles d'orientation dans le référentiel céphalocentré a un effet variable chez les sujets dès lors que c'est le référentiel lui-même qui bouge relativement à l'objet et non pas l'objet qui bouge par rapport au référentiel stabilisé, tel que c'était le cas dans l'expérience 1.

4. Conclusions de la partie expérimentale I

Il a déjà été proposé que la tête sert d'origine à un référentiel important pour les jugements d'orientation (Friedman et Hall, 1996 ; Guerraz et al., 1998b ; Spidalieri et Sgolastra, 1999). Les deux études que nous rapportons ici renforcent cette idée en démontrant les effets d'un cadre visuel céphalocentré sur la perception de la verticalité. Premièrement, lorsqu'un cadre visuel s'incline avec la tête, il donne lieu à des erreurs importantes qui ne peuvent être expliquées par l'addition d'effets visuels et posturaux. Deuxièmement, la vision du cadre lors de ses changements d'orientation dans l'espace ne diminue l'erreur perceptive que lorsque la tête et le cadre sont dissociés. De plus, lorsque le cadre visuel est solidaire de la tête, des erreurs de repositionnement de la tête peuvent survenir et entraîner indirectement des erreurs supplémentaires dans l'estimation de la verticale. Ces résultats suggèrent par conséquent que le traitement de l'information visuelle dans le référentiel céphalocentré est crucial pour le maintien d'une perception constante et adéquate de la direction de la gravité.

Rappelons que les afficheurs de casque sont actuellement développés pour être intégrés dans les appareils militaires car ils présentent l'avantage remarquable de fournir des informations dans le champ visuel du pilote quelle que soit l'orientation de sa tête. A ce titre, des essais sont conduits pour inclure des indicateurs d'attitude dans les afficheurs de casque (Cohen et al., 2001). De plus, Taylor et Kuchar (2000) montrent que ce type d'appareillage peut influencer de façon significative le comportement de la tête du pilote lorsqu'il effectue une manœuvre de rétablissement. Considérés ensemble, ces résultats s'accordent avec les nôtres pour suggérer que si des indicateurs d'attitude, comme une ligne d'horizon, sont entourés d'informations visuelles orientées fixes par rapport à la tête, la perception qu'a le pilote de son orientation peut être significativement altérée. Ceci serait d'autant plus probable lors de vols de nuit durant lesquels des épisodes de désorientation spatiale sont fréquemment rapportés, en raison de l'absence de repères visuels externes. Les informations visuelles orientées n'ont pas forcément besoin d'avoir la forme d'un cadre complet tel que celui utilisé dans les expériences rapportées ici, puisqu'il a été montré qu'un cadre incomplet ou même des contours subjectifs peuvent induire un effet cadre (Antonucci et al., 1995 ; Spinelli et al., 1999 ; Streibel et al., 1980). Ceci devrait inciter les concepteurs en aéronautique à

porter attention aux risques potentiels liés à l'inclusion dans les afficheurs de casque d'informations visuelles dont l'orientation resterait constante par rapport à la tête. Previc (2000) défendait déjà l'idée que l'inclusion d'indicateurs d'attitude asservis à la tête risquait de violer les caractéristiques fondamentales des systèmes nerveux responsables de l'orientation spatiale. Les arguments expérimentaux présentés ici confortent cette idée.

PARTIE EXPERIMENTALE II : Effets de la stimulation galvanique vestibulaire sur la perception de l'orientation spatiale

1. Introduction

La société américaine Virtual Motion basée à Pittsburgh projette de lancer sur le marché du jeu vidéo un procédé dénommé Motionware. Le procédé, annoncé comme révolutionnaire, consiste à enrichir les sensations de mouvements générées par le flux optique (sur des simulateurs de conduite automobile ou de pilotage d'avion, par exemple) avec des stimulations électriques de faible intensité de l'appareil vestibulaire. Le système est constitué d'une manette de jeux couplée à un boîtier commandant des impulsions électriques délivrées par l'intermédiaire de trois électrodes, l'une placée sur le front (une cathode) et les deux autres derrière les oreilles, sur les mastoïdes. Les concepteurs de Motionware affirment que les sensations de mouvement (en translation et en rotation), créées par le dispositif en fonction du déroulement du jeu, participent grandement à l'immersion dans la réalité virtuelle du jeu. Craig Campbell, le concepteur de Motionware, défend également l'idée que le dispositif peut avoir d'autres applications que le jeu vidéo. Il cite, par exemple, l'utilité que pourrait avoir l'introduction de stimulations vestibulaires dans les simulateurs de vol sur lesquels s'entraînent les apprentis pilotes. Elles permettraient de désorienter le pilote en provoquant des sensations vestibulaires conflictuelles, afin qu'il apprenne plus rapidement à négliger les informations vestibulaires (la suppression vestibulaire) au profit des instruments de vol par le canal visuel (la dominance visuelle, cf. § 3.1 du cadre général).

On peut alors facilement imaginer qu'un procédé similaire dans l'esprit à Motionware pourrait être utilisé pour contrôler, dans certaines circonstances bien définies, les perceptions d'un pilote. Prenons, par exemple, le problème des illusions somatograviques couramment rencontrées lors des catapultages. Le pilote a, dans ce cas, l'illusion que son avion se cabre, une illusion due à un effet connu de l'accélération linéaire sur les otolithes. La stimulation directe du système vestibulaire pourrait alors être utilisée pour contrer les effets de l'accélération et empêcher l'illusion d'apparaître.

Autrement dit, cette technique serait envisagée comme un moyen pour lutter contre certaines formes d'occurrence de la désorientation spatiale. Rappelons que l'essentiel des illusions d'orientation provoquées en vol sont d'origine vestibulaire.

Une autre application possible de la stimulation vestibulaire peut être considérée. En effet, parmi les évolutions des aéronefs envisagées par les concepteurs en aéronautique, on trouve l'idée du pilotage déporté, c'est-à-dire le pilotage à distance de l'avion. Le pilote accomplirait sa tâche depuis une cabine fixe au sol et disposerait pour cela d'informations synthétiques lui permettant d'appréhender l'orientation et les mouvements de son avion dans l'espace. La réalité virtuelle pourrait fournir ces informations synthétiques par le biais de la modalité visuelle, mais le pilote n'aurait dans ce cas aucune sensation d'origine vestibulaire, ce qui pourrait largement limiter le réalisme du pilotage et, par conséquent, sa précision. La stimulation directe de l'appareil vestibulaire pourrait pallier à ce problème potentiel.

La technique utilisée par Virtual Motion n'est pas inconnue des neurophysiologistes s'intéressant au fonctionnement du système vestibulaire et des cliniciens en charge de patients vestibulo-lésés. On l'appelle communément la stimulation galvanique vestibulaire (SGV) et ses effets sont démontrés sur plusieurs fonctions sensorimotrices, telles que le contrôle des mouvements oculaires, la posture et la marche. Les effets de la SGV sur la perception de l'orientation spatiale sont moins connus. Cette dernière section du manuscrit va donc faire l'état des lieux des connaissances acquises sur la SGV et tenter de répondre, dans le cadre de deux expérimentations, à plusieurs questions qui restent en suspend.

1.1. La stimulation galvanique vestibulaire

La SGV consiste à appliquer un courant électrique continu d'intensité modérée au niveau des mastoïdes afin de moduler la fréquence de décharge spontanée des fibres du nerf vestibulaire primaire. La fréquence de décharge est accrue si l'électrode est une cathode ou diminuée si s'il s'agit d'une anode (Goldberg et al., 1984). La SGV produit donc des effets indépendants des processus périphériques de transduction mécano-électriques caractéristiques des cellules ciliées. Elle agit directement sur le nerf vestibulaire, qui transmet les afférences à la fois des otolithes et des canaux semi-circulaires.

Les premières observations des effets de la SGV sont dues à Volta qui rapporta des vertiges lorsqu'il faisait passer du courant électrique au travers de son crâne. En 1820, Purkinje fut le premier à décrire les effets de la stimulation sur les mouvements oculaires et la posture. Par la suite, la SGV s'est progressivement imposée dans le domaine clinique comme un outil d'exploration fonctionnelle du système vestibulaire (Babinski, 1903 ; Cass et al., 1996 ; Kayan et al., 1974 ; Pastor et al., 1993 ; Sekitani, 1988). Curieusement, la SGV a été largement délaissée par les expérimentalistes jusqu'à il y a une quinzaine d'années environ (Day, 1999). L'explication tient probablement au fait que la neurophysiologie du système vestibulaire a été très longtemps dominée par l'étude de l'oculo-motricité. Les chercheurs préféraient stimuler directement la mécanique de l'oreille interne en soumettant leurs sujets à des variations de l'environnement gravito-inertiel plutôt qu'employer une technique jugée comme peu naturelle. Cet «inconvenient» est maintenant perçu comme un avantage pour les chercheurs souhaitant étudier la contribution de l'information vestibulaire à des fonctions plus intégrées, comme le contrôle de l'équilibre et l'orientation spatiale. En effet, un problème récurrent associé aux méthodes classiquement utilisées pour stimuler l'appareil vestibulaire, comme les inclinaisons corporelles ou l'altération du champ gravito-inertiel, réside dans le fait qu'elles génèrent des signaux proprioceptifs et somatosensoriels concomitants. En revanche, la SGV a l'avantage d'activer sélectivement le système vestibulaire.

La sélectivité de la SGV semble même s'étendre aux deux composantes de l'appareil vestibulaire, l'appareil otolithique et les canaux semi-circulaires, selon l'intensité de stimulation utilisée. En effet, l'étude des mouvements de torsion oculaire montre que la SGV produit deux types de mouvements en torsion (Schneider et al., 2000 ; Watson et al., 1998). On observe tout d'abord une torsion tonique dans la direction de l'anode, attribuée à l'activation des afférences otolithiques, présente même pour une faible intensité de stimulation. Un nystagmus torsionnel, attribué à l'activation des afférences des canaux semi-circulaires, se surimpose à la torsion tonique, pour des stimulations supérieures à 3 mA (Zink et al., 1998). La distinction faite entre les deux types d'afférences stimulées est aussi suggérée par Kleine et al. (1999) qui montrent une absence de corrélation entre la vitesse de la phase lente du nystagmus et l'amplitude de la torsion tonique. Enfin, Zink et al. (1997) argumentent en faveur d'une implication spécifique des afférences otolithiques pour les SGV de faible intensité, en montrant le parallèle étroit qui existe entre d'une part, les effets de telles stimulations sur la torsion oculaire et l'estimation de la verticale et d'autre part, les effets obtenus sur des patients ayant une atteinte spécifique des voies otolithiques.

1.2. Stimulation galvanique vestibulaire et fonctions motrices

De nombreux travaux s'intéressant à la contribution des informations vestibulaires au contrôle de l'équilibre postural démontrent que la SGV provoque des oscillations latérales du corps (Day et al., 1997 ; Fitzpatrick et al., 1994 ; Popov et al., 1999). Cette réaction posturale se décompose en une oscillation biphasique de faible latence et de faible amplitude, suivie d'une inclinaison lente du corps. La réaction initiale est attribuable au déclenchement de réflexes vestibulo-spinaux de courte (50 ms) et moyenne (100 ms) latence, mis en évidence sur les électromyogrammes des muscles de la jambe. L'inclinaison du corps qui suit et qui atteint son amplitude maximale environ deux secondes après le début de la stimulation ne peut pas quant à elle être expliquée par des mécanismes réflexes (Fitzpatrick et al., 1994). La direction de l'oscillation du corps se fait toujours dans la direction de l'anode, quelle que soit l'orientation de la tête. Par exemple, si la tête est tournée latéralement de 90°, l'oscillation posturale a lieu dans le plan antéro-postérieur. Ivanenko et al. (1999) et Grasso et al. (1999) montrent que la direction de la réponse peut également être modulée par l'orientation du regard. Par conséquent, l'information vestibulaire évoquée par la stimulation est capable de perturber le système moteur complexe qui prend en compte les positions relatives des différents segments corporels, de l'œil aux pieds, pour assurer l'équilibre du corps. C'est pourquoi la réponse posturale est communément interprétée comme la conséquence d'une lecture de la stimulation par le système nerveux central, en tant qu'inclinaison du corps dans la direction de la cathode, poussant le système postural à compenser vers l'anode afin d'éviter une chute.

L'influence de la SGV sur le contrôle moteur dépasse le cadre de l'équilibre postural, puisque Séverac-Cauquil et Day (1998) montrent que faire coïncider la stimulation avec l'exécution d'un mouvement volontaire modifie les caractéristiques du mouvement. Les auteurs en concluent que l'information vestibulaire est utilisée par deux systèmes moteurs, qu'ils supposent distincts, l'un responsable du contrôle de l'équilibre, l'autre de la programmation des mouvements impliquant un déplacement de la tête dans l'espace. Cette hypothèse est appuyée par les travaux de Fitzpatrick et al. (1999) et Bent et al. (2000) qui décrivent un effet important de la SGV sur le chemin emprunté par des sujets chargés de marcher dans l'obscurité droit devant eux ou vers une cible mémorisée. Fitzpatrick et al. (1999) montrent également que la représentation consciente du chemin parcouru par les sujets poussés en fauteuil roulant est altérée. La SGV a donc un effet sur les fonctions de haut niveau responsables de la navigation dans l'espace.

Les études mentionnées jusqu'ici ont toutes été effectuées en utilisant une stimulation binaurale et bipolaire, c'est-à-dire avec une électrode ayant une charge positive (anode) sur une mastoïde et la seconde électrode ayant une charge négative (cathode) sur l'autre mastoïde. Ce type de SGV provoque les réponses posturales les plus importantes, mais il existe d'autres configurations. Il est possible de stimuler le nerf vestibulaire unilatéralement, avec l'électrode active sur une mastoïde et l'autre à un point distant, comme sur le front. Il est également possible de placer deux électrodes de charge identique sur les deux mastoïdes. On parle alors de stimulation bilatérale monopolaire. Séverac-Cauquil et al. (1998, 2000) montrent que chacune des stimulations provoque des oscillations du corps dans des directions différentes par rapport à la tête. Nous l'avons vu, la stimulation binaurale et bipolaire provoque une inclinaison dans le plan frontal de la tête. La stimulation binaurale monopolaire induit quant à elle une réaction dans le plan sagittal de la tête, vers l'avant lorsque les électrodes actives sont des anodes (hyperpolarisation des deux nerfs vestibulaires), vers l'arrière lorsqu'elles sont des cathodes (dépolariation des nerfs). Stimuler un seul nerf vestibulaire provoque une réponse oblique intermédiaire. Il est donc possible de générer grâce à la SGV des réponses dans toutes les directions de l'espace en faisant varier l'équilibre de l'activité des deux nerfs vestibulaires.

L'avancée conséquente des connaissances relatives aux effets posturaux de la SGV a abouti aux travaux de Scinicariello et al. (2001). Ces auteurs testent l'hypothèse selon laquelle la SGV peut être utilisée pour compenser les oscillations posturales provoquées par une perturbation mécanique (une translation de la surface sur laquelle le sujet est debout). La technique utilisée consiste à modéliser les paramètres des mouvements produits par chacune des perturbations (galvanique et mécanique) pour chaque sujet. Les deux fonctions de transfert obtenues sont mise en correspondance au sein d'un modèle pour générer une SGV dont les effets posturaux sont de même amplitude et de direction inverse à ceux de la translation du support. L'étude montre une réduction significative de l'instabilité posturale provoquée par la translation, grâce à la SGV. Les auteurs en concluent qu'il est possible d'envisager la mise au point d'une prothèse vestibulaire grâce à laquelle la posture de sujets présentant des troubles de l'équilibre pourrait être contrôlée de façon systématique. Un système de contrôle serait alimenté par plusieurs accéléromètres, attachés au corps du patient et qui renseigneraient sur les oscillations posturales. Dès lors que l'inclinaison du corps sortirait de limites prédéfinies, le système délivrerait en temps réel une SGV adéquate

pour éviter la chute. L'idée, bien que séduisante, mérite de nombreux travaux complémentaires avant d'être validée. L'enjeu est de définir des algorithmes généraux, paramétrables pour chaque sujet, afin de pouvoir répondre à l'ensemble des situations rencontrées durant les activités quotidiennes. Quoi qu'il en soit, les travaux de Scinicariello et al. (2001) constituent une première tentative de manipulation directe des informations vestibulaires afin de compenser des perturbations issues de l'environnement. Ils pourraient donc constituer une inspiration dans la perspective de modifier les perceptions du pilote dans son avion ou dans sa cabine déportée.

1.3. Stimulation galvanique vestibulaire et illusions d'orientation

Les effets de la SGV sur l'expérience subjective que les sujets ont de l'orientation dans l'espace sont rares. Quelques études récentes s'intéressent cependant aux effets de la SGV sur la verticale subjective. Dans ces études, la perception de la verticalité est évaluée en demandant aux sujets soit de reproduire *a posteriori* l'inclinaison subjective de la scène visuelle ressentie pendant la SGV (Zink et al., 1997, 1998), soit d'indiquer pendant la stimulation la direction de la verticale à l'aide d'une ligne visuelle (Tardy-Gervet et Séverac-Cauquil, 1998). Les sujets perçoivent la scène visuelle comme inclinée dans la direction opposée à la stimulation anodale. Par conséquent, lorsqu'ils ont pour instruction d'indiquer la verticale, ils commettent une erreur en direction de l'anode.

Les études explorant la perception de l'orientation du corps pendant la SGV sont inexistantes, à notre connaissance. Pourtant, des illusions d'inclinaison du corps sont fréquemment rapportées à titre anecdotique (Bense et al., 2001 ; Lobel et al., 1998 ; Quark et al. 1998 ; Watson et al., 1998). L'étude menée par Fitzpatrick et al. (1994) est sans doute celle où les effets sont le mieux décrits. Les auteurs rapportent les commentaires de sujets en station érigée qui font l'expérience de la SGV. Lorsque la posture du sujet n'est pas contrainte, le corps s'incline vers l'anode, comme nous l'avons décrit dans la section précédente. Dans cette condition, le corps est perçu incliné dans le même sens que l'inclinaison réelle. La perception est par conséquent définie comme correcte selon les auteurs, même si elle n'est jamais mesurée. Lorsque la réponse posturale à la SGV est empêchée (le sujet est sanglé à un support rigide), un mouvement illusoire est perçu dans la direction opposée à ce que devrait être l'inclinaison réelle du corps si le mouvement était permis. Les sujets ont également rapporté des illusions de

vection (mouvement continu) pour l'intensité de stimulation la plus élevée (4 mA). L'explication avancée pour expliquer la différence dans les perceptions obtenues entre les conditions «corps libre» et «corps contraint» est que les illusions dépendent de l'information vestibulaire, mais sont dominées par l'information proprioceptive lorsque l'inclinaison corporelle est effective. Ces observations appartiennent au domaine du qualitatif. Aucune mesure de leur intensité n'a jamais été effectuée.

2. Expérience 3 : Effet supramodal de la stimulation galvanique vestibulaire sur la verticale subjective

Publié dans Mars, F., Popov, K. E. & Vercher, J. L. (2001). Supramodal effects of galvanic vestibular stimulation on the subjective vertical. *Neuroreport*, 12, 2991-2994.

Parallèlement aux effets de la SGV sur la verticale subjective, les travaux de Zink et al. (1997, 1998) présentent des données sur la torsion statique des yeux induite par les mêmes stimulations. Les effets perceptifs et oculomoteurs vont dans le même sens et sont tous deux corrélés positivement avec l'intensité de stimulation, l'amplitude de la torsion oculaire n'étant que légèrement inférieure à celle de l'inclinaison de la scène visuelle. La question s'impose alors de savoir si l'inclinaison de la verticale visuelle est la conséquence de l'absence de prise en compte par le système nerveux central de la torsion oculaire.

Cette hypothèse est d'autant plus crédible si l'on considère les travaux de Wade et Curthoys (1997), qui étudient la relation entre torsion oculaire et inclinaison de l'horizontale subjective, toutes deux induites par des inclinaisons du corps entier dans le plan frontal. Les auteurs comparent pour cela deux méthodes d'évaluation de l'horizontale subjective, l'une impliquant une ligne visuelle, l'autre reposant sur des indices proprioceptifs et somatosensoriels, c'est-à-dire l'ajustement dans l'obscurité d'une barre métallique tenue à chaque extrémité par les mains. Ils observent un effet de l'inclinaison du corps dans la modalité visuelle, mais pas dans la modalité somatosensorielle. De plus, l'amplitude de l'inclinaison de la verticale visuelle est très fortement corrélée à celle de la torsion oculaire. Wade et Curthoys (1997) en concluent que la différence observée entre les ajustements visuels et somatosensoriels est essentiellement due à la torsion oculaire induite, contredisant ainsi le modèle de Mittelstaedt (1983, 1986, 1995), qui met l'accent sur les processus centraux pour expliquer l'effet des inclinaisons corporelles sur la verticale subjective.

Le but de l'expérience 3 est de déterminer, dans un protocole à mesures répétées, si l'inclinaison de la verticale subjective induite par la SGV est spécifique à la modalité visuelle. A cette fin, nous avons comparé les estimations de la verticale effectuées en contrôlant à distance l'orientation d'une baguette visuelle (tâche visuelle) à celles

réalisées en orientant à la main une baguette en bois de faible poids dans l'obscurité (tâche somatosensorielle). Si les effets perceptifs de la SGV sont exclusivement la conséquence de la torsion oculaire, les sujets ne devraient pas être influencés par la stimulation lorsqu'ils effectuent la tâche somatosensorielle. Au contraire, des estimations somatosensorielles déviées dans la direction de l'anode suggèreraient un changement supramodal de la verticale subjective, attribuables aux processus centraux sous-tendant la perception de la direction de la gravité. Quel que soit le cas de figure, toute différence observée entre les deux tâches pourra être attribuée à des effets visuo-vestibulaires, en particulier à l'absence de prise en compte de la torsion oculaire.

Un but secondaire de l'expérience est de comparer deux méthodes d'indication de la verticale dans la modalité somatosensorielle. Les deux tâches sont très similaires dans la mesure où elles consistent toutes deux à ajuster l'orientation de la même baguette de bois tenue à une main. Elles diffèrent cependant en ce que, dans une condition, la baguette pivote autour d'un axe monté sur un support fixe par rapport à la Terre, alors que, dans l'autre condition, les sujets tiennent la baguette non-attachée en face d'eux. Un ancrage dans l'espace, tel que celui fourni par le dispositif attaché à la Terre, peut influencer les illusions d'origine vestibulaire. Par exemple, une illusion de rotation du torse induite par la rotation sinusoïdale de la tête d'un sujet stationnaire peut être supprimée, si on offre la possibilité au sujet de prendre en main une poignée fixe dans l'espace (Gurfinkel et Levik, 1993). Par conséquent, nous faisons l'hypothèse qu'un ancrage dans l'espace externe pourrait empêcher une inclinaison potentielle de la verticale subjective de se manifester dans la modalité somatosensorielle.

2.1. Méthodes

Quatorze sujets (3 femmes et 11 hommes, âgés de 21 à 53 ans) ont participé à l'expérience. Aucun d'entre eux n'a déclaré avoir ou avoir eu de problèmes vestibulaires ou neurologiques. Tous avaient une vision normale ou faiblement corrigée. Ils étaient assis dans un siège, la tête maintenue alignée avec l'axe du tronc par la minerve rigidifiable décrite dans l'expérience 1. L'occiput reposait sur un support et une bande de tissu pressait sur le front afin de fermement maintenir la tête en place durant toute l'expérience. Cette méthode de maintien, sans être inconfortable, assurait que les inclinaisons posturales de la tête ou du tronc habituellement associées à la SGV ne puissent avoir lieu.

Les deux électrodes de stimulation utilisées étaient constituées de deux pièces de plastique de 3 cm de diamètre, remplies de tissu préalablement imbibé d'eau salée afin d'assurer une bonne conduction électrique. Elles étaient maintenues en place sur les deux mastoïdes grâce à un ruban de caoutchouc extensible. Les stimuli étaient contrôlés par ordinateur et délivrés par l'intermédiaire d'un générateur de courant constant fonctionnant sur batterie. Une augmentation progressive de l'intensité du stimulus a été préférée à un incrément brutal afin d'éviter les désagréments associés à ce dernier type de stimulation. Dans ces conditions, la SGV provoquait des sensations cutanées modérées. Aucune douleur n'a été signalée par les sujets. Deux intensités de stimulation ont été utilisées (1,25 mA et 2,5 mA), avec l'anode placée sur la mastoïde droite ou sur la gauche. Ces intensités ont été choisies car il a été démontré précédemment qu'elles produisent une inclinaison de la verticale subjective et une torsion oculaire statique sans toutefois provoquer de nystagmus horizontal ou en torsion (Watson et al., 1998 ; Zink et al., 1998). Des essais contrôles ont également été effectués sans stimulation. Le déroulement temporel d'un essai est décrit par la figure 39. Si le sujet déclarait ne pas être satisfait de sa performance à la fin d'un essai, celui-ci était réalisé de nouveau à la fin de la session expérimentale. L'expérience était composée de trois sessions expérimentales, effectuées à des jours différents. Une session durait approximativement une heure et comportait 25 essais, ce qui correspondait à cinq stimuli différents (deux stimulations anodales à gauche, un essai contrôle sans stimulation, deux stimulations anodales à droite), répétés cinq fois. L'ordre de présentation des stimuli était déterminé de façon aléatoire pour chaque sujet. Une période de repos de 30 secondes séparait deux essais consécutifs.

Les trois sessions expérimentales différaient par la méthode d'évaluation de la verticalité. L'ordre de présentation a été contrebalancé.

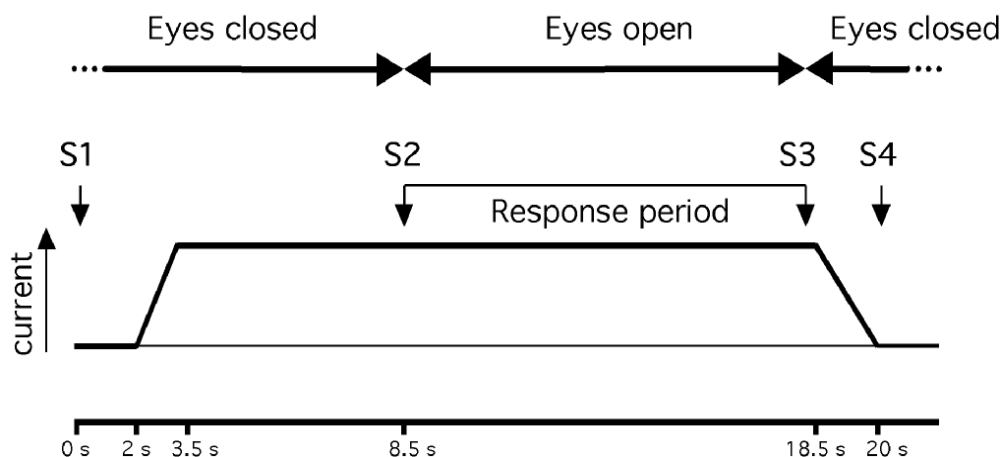


Fig. 39 : Décours temporel d'un essai. S1, S2, S3 et S4 sont des sons générés par ordinateur qui ponctuent l'essai. S1 signale le début de l'essai. S2 et S3 délimitent respectivement le début et la fin de la fenêtre de réponse durant laquelle les sujets ouvrent les yeux, quelle que soit la condition (même si la tâche n'implique pas la vision), et ajustent la baguette à la verticale. S4 signale la fin de la stimulation et le début de la période de repos.

Dans la condition «visuelle» (VL, Fig. 40A), une baguette lumineuse blanche de 12° d'angle était affichée sur un moniteur informatique placé en face du sujet. Un cache noir, attaché sur la façade du moniteur, masquait les contours de l'écran. La baguette apparaissait au travers d'une ouverture circulaire, découpée au centre du cache et couverte d'un film translucide. Le film servait à empêcher le sujet de se servir de l'alignement vertical des pixels pour orienter la baguette. Durant toute la session expérimentale, la baguette et la fenêtre circulaire étaient les seuls éléments visibles de la pièce. La baguette pouvait pivoter dans une direction ou dans l'autre en agissant sur une manette de jeux que le sujet tenait sur ses jambes. L'orientation initiale de la baguette était déterminée de façon aléatoire par le programme informatique et sa position finale était enregistrée.

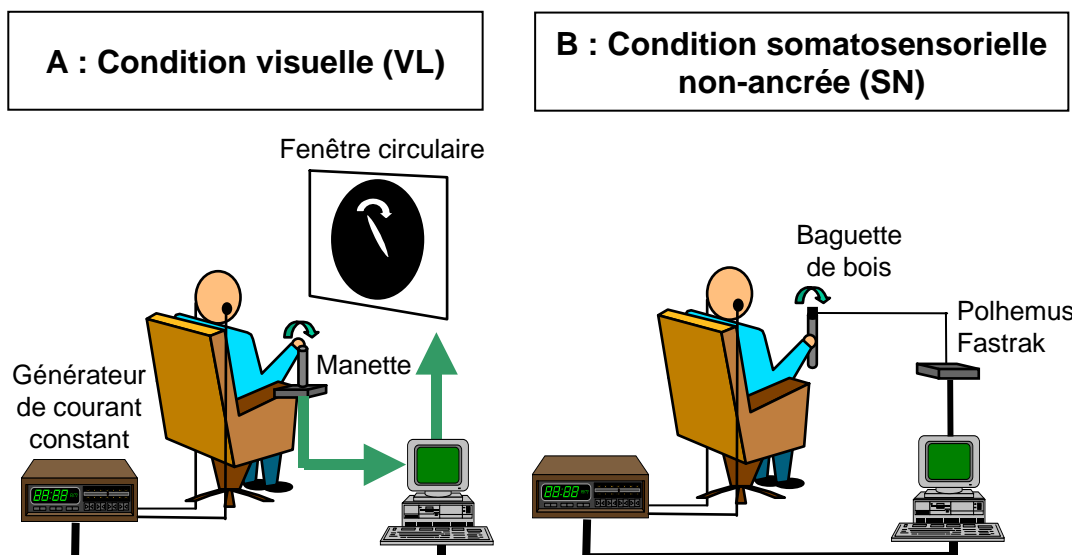


Fig. 40 : Schéma du dispositif expérimental pour les conditions «visuelle» (A) et «somatosensorielle non-ancrée» (B). La troisième modalité de réponse («somatosensorielle ancrée») est identique à la condition B, à ceci près que la baguette pivote en son centre autour d'un axe fixe monté sur un support.

Dans la condition «somatosensorielle non-ancrée» (SN, Fig. 40B), le sujet tenait une baguette de bois (75 g pour 23 cm de longueur) par son milieu, le pouce placé dans l'alignement de la baguette. Entre les essais, la main tenant la baguette reposait sur les jambes du sujet. Lorsqu'il avait pour instruction d'indiquer la verticale, le sujet levait la main au niveau de la poitrine, droit devant le milieu du tronc, et devait maintenir la baguette verticale jusqu'au signal sonore signalant la fin de l'essai. Le récepteur d'un dispositif magnétique de type Polhemus Fastrak était fixé sur le sommet de la baguette. Son orientation était contrôlée et enregistrée tout au long de l'essai afin de s'assurer que la réponse était nettement stabilisée avant la fin de la stimulation. Dans le cas contraire, l'essai était rejeté.

Dans la condition «somatosensorielle ancrée» (SA), la baguette de bois utilisée dans la condition précédente, était montée sur un support et ne pouvait donc que pivoter autour d'un axe central fixe, situé droit devant le milieu du tronc. Avant le début de l'expérience, le sujet était entraîné à atteindre la baguette dans l'obscurité sans tâtonner et à la tenir de façon appropriée, c'est-à-dire de la même manière que dans la condition SN. Un effort très faible était nécessaire pour changer l'orientation de la baguette. Le parcours manuel de la baguette, qui aurait fourni des informations haptiques additionnelles, n'était pas autorisé. L'expérimentateur changeait l'orientation initiale de la baguette de façon aléatoire entre les essais.

2.2. Résultats

La figure 41A résume les données moyennes obtenues dans l'expérience. Elle montre que la SGV aboutit toujours à une déviation des estimations de la verticale vers l'anode, en comparaison avec les valeurs de référence obtenues dans les conditions contrôles. Pour les analyses statistiques, l'erreur commise dans la condition contrôle (pas de stimulation) a été soustraite aux erreurs commises pendant la SGV (Fig. 41B). Les erreurs dans la direction de l'anode et les erreurs dans la direction de la cathode se sont vues assigner respectivement des valeurs positives et négatives.

Une ANOVA à mesures répétées 2 (1,25 mA / 2,5 mA) X 2 (anode à droite / anode à gauche) X 3 (VL / SA / SN), réalisée sur ces données, révèle un effet significatif de l'intensité de stimulation [$F(1,13) = 6,28$; $p < .05$], pas d'effet du placement de l'anode [$F(1,13) = 0,04$] et un effet de la modalité de réponse [$F(2,26) = 6,22$; $p < .01$]. Aucune interaction n'est significative. Des analyses de contrastes testent si les estimations de la verticale sont déviées dans la direction de l'anode pour chaque modalité. L'effet est significatif pour VL [$F(1,13) = 17,06$; $p < .01$], SN [$F(1,13) = 39,27$; $p < .001$] et SA [$F(1,13) = 7,89$; $p < .05$]. De plus, des tests de Newman-Keuls indiquent que les erreurs commises dans VL sont significativement plus grandes que celles commises dans SN ($p < .05$) et que celles commises dans SA ($p < .01$). Les deux modalités de réponse somatosensorielles ne diffèrent pas en moyenne. Cependant, des analyses de corrélation révèlent des différences entre les deux tâches (Tab. 2). En effet, les performances dans SA et SN ne sont pas corrélées ($r = 0,20$). Par ailleurs, alors que SN tend à être corrélée positivement à son équivalent visuel, même si la corrélation n'atteint pas le seuil de significativité ($r = 0,47$; $p < .10$), SA n'est pas du tout corrélée avec VL ($r = 0,06$).

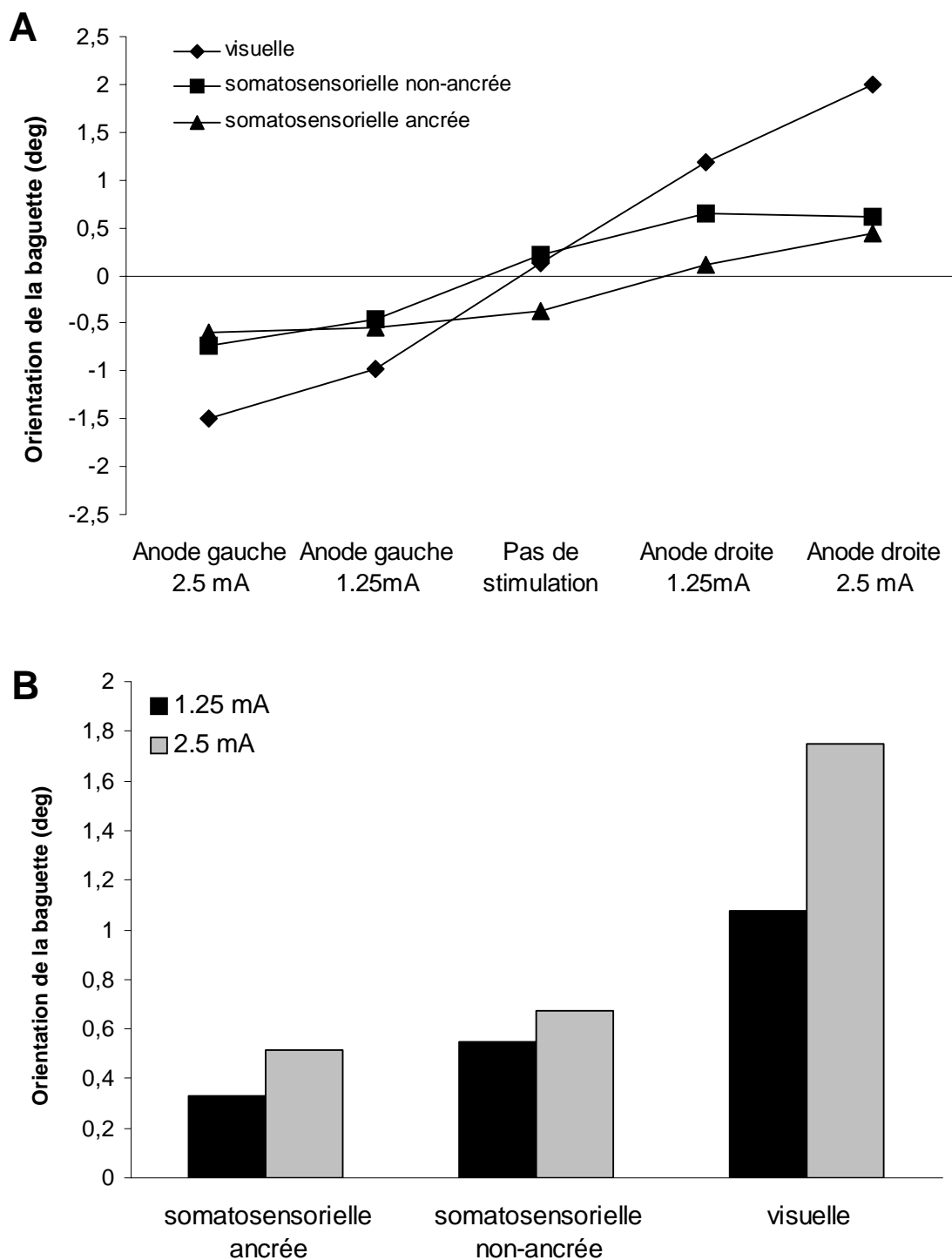


Fig. 41 : Effet de la SGV sur la verticale subjective en fonction de l'intensité de stimulation, de la position de l'anode et de la modalité de réponse. En A, une valeur positive correspond à une erreur vers la droite par rapport à la verticale réelle alors qu'une valeur négative correspond à une erreur vers la gauche. Quelle que soit la modalité de réponse, les estimations de la verticale sont déviées vers l'anode par rapport à la condition contrôle (sans stimulation). En B, les valeurs contrôles ont été soustraites aux estimations effectuées avec SGV, de telle sorte qu'une valeur positive correspond cette fois à une erreur commise dans la direction de l'anode. Les résultats obtenus avec l'anode placée sur la mastoïde droite et sur la mastoïde gauche ont été moyennés.

Sujet	Visuel	Somatosensoriel non-ancré	Somatosensoriel ancré
1	4,52	0,95	0,83
2	3,43	0,96	0,11
3	2,54	0,86	-0,24
4	1,67	0,66	0,81
5	1,51	0,25	0,83
6	1,25	0,18	0,93
7	1,08	0,42	-0,25
8	0,98	1,29	-0,04
9	0,66	0,16	0,46
10	0,66	0,97	0,02
11	0,63	0,66	0,53
12	0,59	0,64	0,96
13	0,43	0,45	1,40
14	-0,18	0,11	-0,44
Moyenne	1,41	0,61	0,42
Ecart-type	1,28	0,36	0,56

Tableau 2 : Effets moyens de la SGV sur la verticale subjective en fonction de la modalité de réponse, indépendamment de l'intensité de stimulation et de la position de l'anode (les valeurs ont été moyennées selon ces deux variables). Les données sont ordonnées en fonction de l'amplitude de l'effet obtenu dans la condition VL. Les valeurs grisées signalent les conditions dans lesquelles aucun effet de la SGV ne peut être décrit.

2.3. Discussion

En accord avec ce qui a été rapporté dans les études précédentes (Tardy-Gervet et Severac-Cauquil, 1998 ; Zink et al., 1997, 1998), nos résultats montrent que la SGV provoque une inclinaison de la verticale visuelle vers l'anode. Ils démontrent aussi pour la première fois que cet effet n'est pas spécifique à la modalité visuelle : il peut également être observé lorsque des sujets indiquent la verticale dans l'obscurité à l'aide d'une baguette tenue dans une main, une tâche reposant sur des informations proprioceptives et somatosensorielles. L'effet est plus faible lorsque la vision est exclue mais bien présent, en particulier lorsque le dispositif ne fournit pas de références fixes dans l'espace. Les deux tâches somatosensorielles ne diffèrent pas en moyenne lorsqu'elles sont utilisées pour évaluer la direction de la verticale. Cependant, lorsque le dispositif n'est pas ancré à un support terrestre, l'effet de la SGV se retrouve chez un plus grand nombre de sujets. Cette observation pouvait être prédite puisqu'il a été montré qu'un ancrage stable dans l'espace peut supprimer des illusions d'origine vestibulaire (Gurfinkel et Levik, 1993) et améliorer la stabilité posturale (Jeka et Lackner, 1994).

L'amplitude des effets de la SGV sur la verticale subjective est caractérisée par une grande variabilité interindividuelle, comme des études antérieures l'ont déjà montrée, et certains sujets sont affectés différemment par la stimulation en fonction de la tâche. La variabilité interindividuelle associée aux effets de la SGV sera discutée dans la conclusion de ce chapitre (§ 3.4). En dépit de cette variabilité et d'un groupe réduit de sujets testés, le fait que les estimations visuelles et somatosensorielles non-ancrées tendent à corrélérer suggère que les deux effets partagent, au moins en partie, des processus communs. Nous proposons que les effets observés dans la modalité somatosensorielle reflètent une modification des processus centraux en charge de la mise à jour du référentiel gravitaire. Cette hypothèse est soutenue par des études neurophysiologiques utilisant les techniques d'imagerie fonctionnelle à résonance magnétique (Bense et al., 2001; Lobel et al., 1998). La SGV active des aires corticales impliquées dans le contrôle oculomoteur et dans les fonctions vestibulaires, mais également des aires intégratives multisensorielles, telles que le lobe pariétal postérieur, connu pour être impliqué dans la construction et la mise à jour des référentiels spatiaux (Andersen et al., 1997).

Dans les travaux de Zink et al. (1997, 1998), une SGV de 2,5 mA induit une inclinaison de la verticale subjective supérieure de $0,7^\circ$ en moyenne à l'amplitude de la torsion oculaire. Dans notre expérience, l'effet observé sur les estimations somatosensorielles est de la même amplitude. Ceci pourrait suggérer que les effets observés dans la modalité visuelle sont la conséquence de l'addition des effets de la torsion oculaire et de l'inclinaison de la représentation centrale de la gravité. Cette hypothèse impliquerait que la torsion oculaire induite par une manipulation de l'information vestibulaire n'est pas prise en compte par le système perceptif (soit par le biais de la copie d'efférence, soit par la proprioception des muscles des yeux) pour effectuer des jugements d'orientation, comme il a déjà été proposé (Curthoys, 1996; de Graaf et al. 1992). Cette hypothèse s'oppose au modèle de Mittelstaedt (1983, 1986, 1995) qui met en avant les processus centraux d'intégration qui régissent l'interaction entre les informations vestibulaires, somesthésiques et visuelles (cf. §1.3.3 du cadre général). La grande force de la modélisation mathématique proposé par Mittelstaedt rend compte à la fois de l'effet Müller, qui pourrait en effet être expliquée en théorie par une contre-torsion oculaire, et de l'effet Aubert, dont la direction s'oppose à celle de la torsion oculaire et qui apparaît à des amplitudes d'inclinaison du corps pour lesquelles la torsion oculaire atteint un maximum. De plus, Nakayama et Balliet (1977), et plus

récemment Haustein et Mittelstaedt (1990), étudient la relation entre la torsion oculaire provoquée par un positionnement oblique du regard, en accord avec la loi de Listing, et la verticale visuelle. Ils concluent que, bien que les jugements de verticalité ne soient pas véridiques, ils ne se conforment pas à une prédiction rétinotopique. Par conséquent, un signal extra-rétinien, probablement dérivé de la copie d'efférence de la commande de direction du regard, permettrait de compenser en partie la torsion oculaire. La question reste de savoir si une torsion oculaire induite par une orientation oblique du regard est compensée de la même façon qu'une torsion induite par une modification de l'information vestibulaire.

Que la différence entre les estimations visuelles et somatosensorielles rapportée dans notre étude corresponde ou non à l'amplitude de la torsion oculaire reste donc à déterminer. Watson et al. (1998), qui ont enregistré la torsion oculaire pendant une SGV maintenue dans le temps (comme dans notre étude), accréditent cette hypothèse. Ils observent qu'une SGV de 3 mA produit une torsion tonique d'environ $0,8^\circ$, ce qui est de l'ordre de la différence que nous avons observée entre les estimations visuelles et somatosensorielles à 2,5 mA. Une réplique de notre expérience avec un enregistrement de la torsion oculaire clarifierait sans aucun doute ce point.

3. Expérience 4 : Dissociation entre inclinaison de la verticale subjective et illusions d'orientation du corps induites par la stimulation galvanique vestibulaire

Manuscrit en préparation : Mars, F., Popov, K. E. & Vercher, J. L. (en préparation). Tilt of the subjective vertical and of the subjective body orientation elicited by galvanic vestibular stimulation.

L'expérience 4 s'intéresse aux effets simultanés de la SGV sur la verticale subjective et sur la perception de l'orientation corporelle chez des sujets assis. Le premier objectif de l'étude est de quantifier les illusions d'inclinaison du corps induites par la stimulation, étant donnée l'absence de ce type de données dans la littérature existante. Le second objectif est d'analyser les liens unissant ces illusions à l'inclinaison de la verticale subjective.

Comme nous l'avons vu précédemment (§ 1.3.3 du cadre général), la conception autrefois répandue selon laquelle l'inclinaison de la verticale subjective est l'image en miroir d'une illusion d'inclinaison du corps souffre à l'heure actuelle d'un nombre de plus en plus important de contre-exemples expérimentaux (Anastasopoulos et al., 1997 ; Bisdorff et al., 1996 ; Ito et Gresty, 1996, 1997 ; Mast et Jarchow, 1996 ; Mittlestaedt, 1986). Selon Bronstein (1999), l'idée d'une représentation interne de la verticalité unique et accessible à l'ensemble des systèmes perceptifs et moteurs est à proscrire. Il base sa conception sur la comparaison de la verticale subjective et de la verticale posturale, c'est-à-dire l'indication faite par un sujet incliné lentement en roulis ou en tangage de son entrée ou de sa sortie d'une zone dans laquelle il se perçoit droit. Une dissociation nette de la performance dans les deux tâches est observée chez des sujets souffrant d'une lésion unilatérale du système vestibulaire. Chez ces patients, la verticale subjective est biaisée du côté de la lésion, mais on ne note aucune baisse de la performance moyenne par rapport aux sujets normaux en ce qui concerne la verticale posturale. La dissociation est retrouvée chez des sujets normaux faisant face à un disque en rotation. La verticale subjective est inclinée dans la direction du mouvement du disque, mais ce n'est pas le cas de la verticale posturale. Bronstein (1999), sans nier

l'avantage fourni par l'information vestibulaire, en conclut que l'information somatosensorielle a un rôle primordial dans la perception de la verticalité et qu'elle influe différemment selon la nature de la tâche.

Van Beuzekom et Van Gisbergen (2000) observent également une dissociation entre perception de la verticale et perception de l'orientation du corps, lorsque le corps est incliné en roulis. Cette fois l'orientation du corps est indiquée verbalement en utilisant une métrique analogique (le sujet doit indiquer l'orientation de son corps en minutes en se représentant une horloge). Dans une étude extrêmement fouillée, ils mettent en évidence un effet Aubert à la suite de 24 s d'inclinaison du corps en roulis. L'effet est assez similaire, que la verticale soit indiquée par l'ajustement d'une barre lumineuse (tâche visuelle) ou par des saccades oculaires (tâche motrice). En revanche, l'erreur commise dans l'estimation de l'orientation du corps se démarque clairement. Là encore, les auteurs mettent en avant l'information somatosensorielle pour expliquer la non-équivalence des deux percepts pour une même manipulation expérimentale. L'orientation de la tête dans l'espace, reconstruite à partir des informations otolithiques et canaliculaires, interagirait avec des afférences somatosensorielles différentes et serait sous l'influence de modèles internes distincts pour la détermination des deux réponses perceptives. En particulier, les afférences graviceptives viscérales mises en exergue par Mittelstaedt (1995a, 1995b, 1998) interviendraient de façon plus significative sur la perception de l'orientation du corps que sur la verticale subjective.

Les travaux cités jusqu'ici pour illustrer la dissociation entre les deux percepts ont consisté à incliner le corps des sujets et donc à modifier à la fois les informations vestibulaires et les informations somesthésiques. La SGV va nous permettre d'établir si cette dissociation apparaît pour une stimulation spécifique des afférences vestibulaires, en particulier otolithiques, étant données les intensités de stimulation choisies. Il semble raisonnable de faire cette prédiction si on se réfère aux travaux de Horak et Hlavacka (2001), qui mettent en évidence des interactions vestibulo-somesthésiques importantes grâce à la SGV. Ils montrent en effet une modulation des réponses posturales à la SGV en fonction de la richesse des informations somatosensorielles disponibles. L'effet de la manipulation de l'information vestibulaire augmente dès lors que la surface d'appui devient moins stable ou que le sujet souffre de la perte des informations proprioceptives à la suite d'une neuropathie.

La perception de la verticale et la perception de l'orientation du corps sont évaluées dans cette expérience pour une même stimulation spécifique des afférences

vestibulaires. De plus, la modalité de réponse est identique : la barre lumineuse utilisée pour estimer la verticale subjective pendant la SGV est également utilisée pour estimer *a posteriori* l'amplitude des illusions perçues. L'équivalence des modalités de réponses pour les deux variables n'était pas non plus de mise dans les travaux précédents. Enfin, pendant l'expérience, la tête des sujets est soit bloquée, soit libre. Cette dernière variable est introduite dans le plan expérimental afin d'évaluer d'une part, si l'immobilité posturale contrainte est nécessaire à l'apparition des illusions corporelles, comme le suggèrent Fitzpatrick et al. (1994), et d'autre part, s'il existe un lien entre la réponse posturale de la tête et l'une des mesures perceptives.

3.1. Méthodes

Neuf sujets (3 femmes et 6 hommes, âgés de 22 à 42 ans) ont participé à l'expérience. Aucun d'entre eux n'a déclaré avoir ou avoir eu de problèmes vestibulaires ou neurologiques. Tous avaient une vision normale ou faiblement corrigée.

Les sujets étaient assis dans un siège baquet, le torse maintenu par un système de sangles. Dans une première session expérimentale, la tête était maintenue alignée avec l'axe du tronc par deux presses appuyant sur les tempes. Dans une seconde session, la tête était libre. Les sessions «tête libre» et «tête fixe» ont eu lieu à un ou deux jours d'intervalle et leur ordre de présentation a été contrebalancé.

Le matériel utilisé pour générer les SGV (générateur de courant constant et électrodes) était identique à celui décrit dans l'expérience 3. Le décours temporel d'une stimulation était également similaire (Fig. 39), à ceci près que la stimulation était contrôlée manuellement par l'expérimentateur (l'expérience 4 a été réalisée avant l'expérience 3, à un moment où le logiciel de contrôle des stimulations n'était pas encore mis au point). L'essai débutait donc par une augmentation progressive de l'intensité du courant dans un délai d'environ deux secondes. Cinq secondes plus tard, l'expérimentateur donnait au sujet le signal d'ouvrir les yeux et d'effectuer l'ajustement à la verticale d'une baguette lumineuse (même matériel et mêmes caractéristiques que dans les expériences précédentes). Le sujet disposait de 10 s pour s'acquitter de cette tâche, à l'issue de laquelle il avait pour instruction de fermer les yeux. A cet instant, l'intensité de stimulation était ramenée à zéro. Si le sujet déclarait ne pas être satisfait de sa performance à la fin des 10 s, l'essai était réalisé de nouveau à la fin de la session expérimentale.

Huit secondes après la fin de la stimulation, le sujet devait indiquer à l'aide de la baguette lumineuse l'orientation de son tronc et de sa tête, telles qu'il les avait perçues lors de la stimulation. L'axe de symétrie vertical de l'écran représentait la verticale gravitaire et la baguette le segment corporel dont l'orientation était retranscrite. Des essais préliminaires ont montré qu'indiquer l'orientation absolue de la tête dans l'espace semblait plus naturelle et plus facile aux sujets qu'indiquer l'orientation de la tête sur le tronc. A l'issue de chaque essai, il était demandé au sujet de décrire verbalement ses sensations, le plus précisément possible. Il lui était demandé par exemple de signaler l'évolution des illusions dans le temps, la présence éventuelle d'une sensation de vection (sensation de rotation continue sans changement d'orientation statique) ou toute autre indication inhabituelle.

Cinq conditions de stimulation ont été testées : 1,5 mA et 3 mA avec l'anode placée sur la mastoïde droite, les mêmes intensités avec l'anode sur la mastoïde gauche et une valeur de référence obtenue sans stimulation. Chaque condition de stimulation a été répétée cinq fois. L'ordre de présentation des 25 essais était déterminé de façon aléatoire pour chaque sujet, mais de telle sorte que chaque bloc de 5 stimulations comporte chacune des 5 conditions de stimulation. Une période de repos de 30 secondes séparait deux essais consécutifs.

Dans la condition «tête libre», le dispositif magnétique Fastrak, dont un récepteur était attaché à un casque ajustable porté par le sujet, mesurait l'orientation de la tête par rapport au tronc. Lors de la validation de l'estimation de la verticale, l'orientation effective de la tête était enregistrée. Les sujets avaient pour instruction de ne pas résister à une éventuelle inclinaison de la tête produite par la SGV, mais de ne pas l'accentuer non plus.

3.2. Résultats

3.2.1. Analyses globales

La figure 42 représente l'effet de la SGV sur la verticale subjective, l'orientation perçue de la tête par rapport au tronc et l'orientation perçue du tronc par rapport à la verticale, dans les conditions «tête libre» et «tête fixe». La verticale subjective est déviée dans la direction de l'anode par rapport à la condition de référence (sans stimulation). D'un point de vue descriptif, la déviation est légèrement supérieure dans la

condition «tête libre» pour toutes les stimulations. Le tronc est perçu comme incliné du côté opposé à l'anode, d'une amplitude 4,1 fois supérieure à la verticale subjective dans la condition «tête libre» et 2,3 fois supérieure en condition «tête fixe». A l'inclinaison illusoire du tronc s'ajoute une inclinaison perçue de la tête dans la même direction et d'une amplitude semblable à celle du tronc. L'amplitude des illusions corporelles est légèrement supérieure cette fois dans la condition «tête fixe».

Pour tester la significativité de ces observations, une ANOVA à mesures répétées 5 (-3 mA / -1,5 mA / 0 / 1,5 mA / 3 mA) X 2 (tête libre / tête fixe) a été réalisée pour chaque variable dépendante. Les trois ANOVA aboutissent aux mêmes résultats quelle que soit la variable considérée. Elles révèlent un effet significatif de l'intensité de stimulation [verticale subjective : $F(4,32) = 4,64$, $p < .01$; Inclinaison subjective de la tête : $F(4,32) = 5,47$, $p < .01$; Inclinaison subjective du tronc : $F(4,32) = 5,76$, $p < .01$], une absence d'effet de la liberté de la tête et une interaction non-significative entre les deux variables indépendantes. Des contrastes *a priori* testent la linéarité des effets en fonction de l'intensité de stimulation pour les 3 variables dépendantes. L'effet est significativement linéaire au seuil de .05 pour la verticale subjective et pour l'illusion d'orientation de la tête dans la condition «tête fixe». Les autres effets ne montrent qu'une tendance à la linéarité ($p < .10$ ou $p < .15$).

Dans la condition «tête libre», la tête des sujets s'est légèrement inclinée vers l'anode lors des SGV par rapport à la condition de référence. Une ANOVA univariée testant l'effet de l'intensité de stimulation sur l'orientation réelle de la tête montre qu'il s'agit d'une tendance non-significative [$F(4,32) = 2,37$; $p < .08$]. La figure 43 met en rapport la réponse posturale avec l'inclinaison perçue de la tête et la verticale subjective.

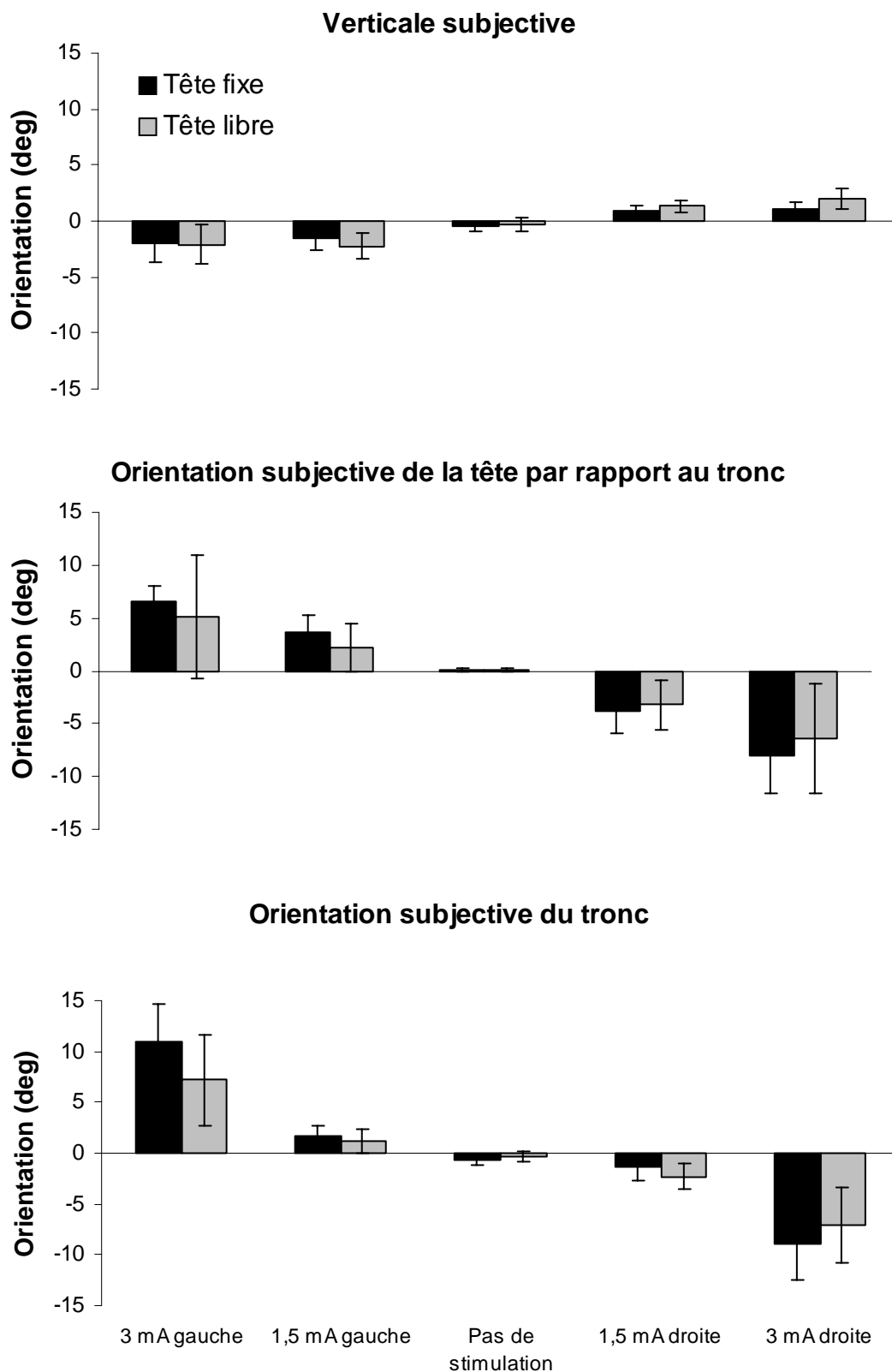


Figure 42 : Effets de la SGV sur la verticale subjective, sur l'inclinaison perçue de la tête par rapport au tronc et sur l'inclinaison perçue du tronc par rapport à la verticale réelle. Une valeur positive correspond à une erreur vers la droite par rapport à la verticale réelle alors qu'une valeur négative correspond à une erreur vers la gauche. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur-type.

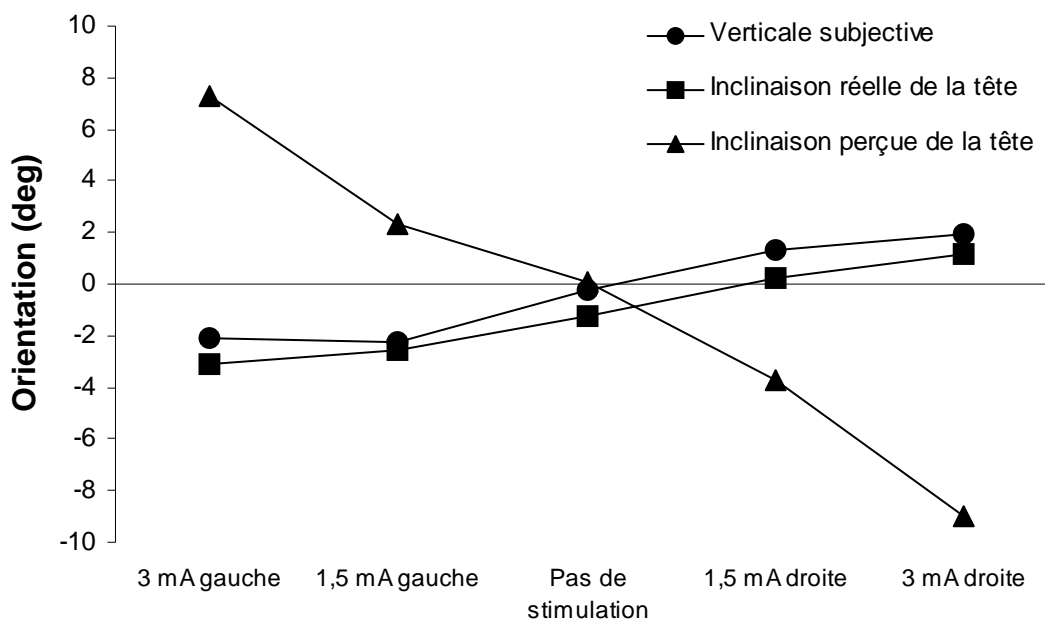


Figure 43 : Effets de la SGV sur la verticale subjective, l'orientation perçue de la tête et son orientation réelle dans la condition «tête libre».

3.2.2. Analyses individuelles

Les analyses individuelles ont été réalisées en testant l'effet de l'intensité de stimulation par une ANOVA univariée, pour chaque sujet et pour chaque variable dépendante. La répétition des essais formait le facteur aléatoire, avec cinq observations pour chacune des cinq intensités de stimulation. Vingt-sept ANOVA ont donc été réalisées pour la condition «tête fixe» (9 sujets x 3 variables dépendantes), 36 pour la condition «tête libre» (9 sujets x 4 variables dépendantes).

Les tableaux 3 et 4 résument l'ensemble des données individuelles. Pour plus de clarté, une valeur synthétique représentant l'effet obtenu pour chaque sujet et pour chaque variable a été calculée en exprimant l'erreur en tant que déviation vers l'anode (la valeur de référence a été retranchée aux conditions avec stimulation et les signes inversés lorsque l'anode était placée à gauche), puis en moyennant les valeurs obtenues. Une valeur positive représente donc une déviation vers l'anode pour une intensité théorique de stimulation d'environ 2,25 mA, si l'on se fie à la quasi-linéarité des effets observés. Les tableaux indiquent, pour chaque valeur, la significativité de l'effet, calculée par les ANOVA.

Les valeurs sont ordonnées pour mettre en évidence trois groupes de sujets montrant des profils de réponses différents. Les sujets 1, 2 et 3 ne montrent pas d'effet

de la stimulation sur la verticale subjective, mais présentent des effets significatifs sur les illusions d'orientation corporelle, parfois limitées à la tête, parfois également présentes pour le tronc. Les sujets 4 et 5 ont un profil inverse, c'est-à-dire une erreur significative sur la verticale subjective sans illusion corporelle, dans la condition «tête fixe». Dans la condition «tête libre», des illusions apparaissent chez le sujet 5. Les sujets 6, 7, 8 et 9 sont caractérisés par un effet de la SGV à la fois sur la verticale subjective et sur l'estimation de l'orientation du corps. Dans la condition «tête libre», l'orientation réelle de la tête est déviée de façon significative chez tous les sujets, dans la direction de l'anode, sauf pour le sujet 1.

Des corrélations linéaires ont également été effectuées entre les séries de valeurs présentées dans les colonnes des tableaux 3 et 4. Seules deux d'entre elles sont significatives. Une première corrélation positive est observée entre les estimations de la verticale dans la condition «tête fixe» et celles dans la condition «tête libre» (pente = 1,52 ; constante = 0,29 ; $r = 0,93$, $p < .001$). La seconde est la corrélation positive entre l'orientation réelle de la tête et son orientation perçue (pente = 0,18 ; constante = 2,8 ; $r = 0,63$, $p < .05$). Cette dernière corrélation reflète seulement le fait que les sujets ayant le plus incliné la tête vers l'anode (sujet 2 et 3) ont également estimé leur tête comme inclinée dans cette direction, par contraste avec les autres sujets ayant montré une inclinaison effective moindre, accompagnée d'une illusion vers la cathode. Aucune corrélation significative (pas même une tendance) n'existe entre les erreurs observées sur la verticale subjective et l'amplitude des inclinaisons corporelles subjectives, en «tête libre» comme en «tête fixe».

Condition «Tête fixe»			
Sujet	Verticale subjective	Inclinaison perçue de la tête	Inclinaison perçue du tronc
1	-0,38 ^{ns}	-2,57 ^{***}	-5,61 ^{***}
2	0,38 ^{ns}	-16,79 ^{***}	-5,62 ^{***}
3	0,49 ^{ns}	-8,79 ^{***}	-1,64 ^{ns}
4	0,99 ^{***}	0,05 ^{ns}	3,91 ^{ns}
5	1,07 ^{***}	-0,91 ^{ns}	0,12 ^{ns}
6	0,81 [*]	-7,28 ^{***}	-14,53 ^{***}
7	1,81 ^{***}	-2,39 ^{***}	-15,55 ^{***}
8	1,98 ^{***}	-11,65 ^{***}	-7,71 ^{**}
9	5,39 ^{***}	-4,09 ^{***}	-4,74 ^{***}
Moyenne	1,39	-6,05	-5,71
Ecart-type	1,66	5,58	6,35

Tableau 3 : Effets individuels de la SGV sur la verticale subjective, sur l'inclinaison perçue de la tête et sur l'inclinaison perçue du tronc, dans la condition «tête fixe». Une valeur positive représente une déviation de la mesure vers l'anode (voir le texte pour le mode de calcul).

Condition «Tête libre»				
Sujet	Verticale subjective	Inclinaison perçue de la tête	Inclinaison perçue du tronc	Inclinaison réelle de la tête
1	1,03 ^{ns}	-12,87 ^{***}	1,92 ^{ns}	-3,27 ^{***}
2	-0,66 ^{ns}	13,20 ^{***}	-1,86 ^{ns}	7,93 [*]
3	0,61 ^{ns}	4,47 ^{***}	0,10 ^{ns}	2,20 ^{***}
4	1,10 ^{**}	0,60 ^{ns}	0,04 ^{ns}	1,34 ^{***}
5	1,29 ^{**}	-7,45 ^{***}	-12,86 ^{***}	1,07 [*]
6	1,43 [*]	-12,69 ^{**}	-11,33 ^{**}	1,05 ^{**}
7	2,11 ^{***}	-2,13 ^{***}	-17,29 ^{***}	1,68 ^{**}
8	1,39 ^{***}	-20,59 ^{***}	0,25 ^{ns}	0,97 ^{**}
9	8,82 ^{***}	-12,83 ^{***}	1,09 ^{ns}	2,90 ^{***}
Moyenne	1,90	-5,59	-4,44	1,76
Ecart-type	2,70	10,54	7,28	2,89

Tableau 4 : Effets individuels de la SGV sur la verticale subjective, l'inclinaison perçue de la tête, l'inclinaison perçue du tronc et l'inclinaison réelle de la tête dans la condition «tête libre». Une valeur positive représente une déviation de la mesure vers l'anode (voir le texte pour le mode de calcul).

Une dernière observation issue des analyses individuelles est illustrée par la figure 44. Elle tient dans le fait que les sujets ayant présenté un effet significatif de la SGV sur la verticale subjective ont montré un effet sur la posture de la tête remarquablement parallèle. La seule exception est le sujet 9 qui, bien qu'ayant un effet notable de la SGV sur l'orientation de la tête, a exhibé un effet encore plus important sur la verticale subjective.

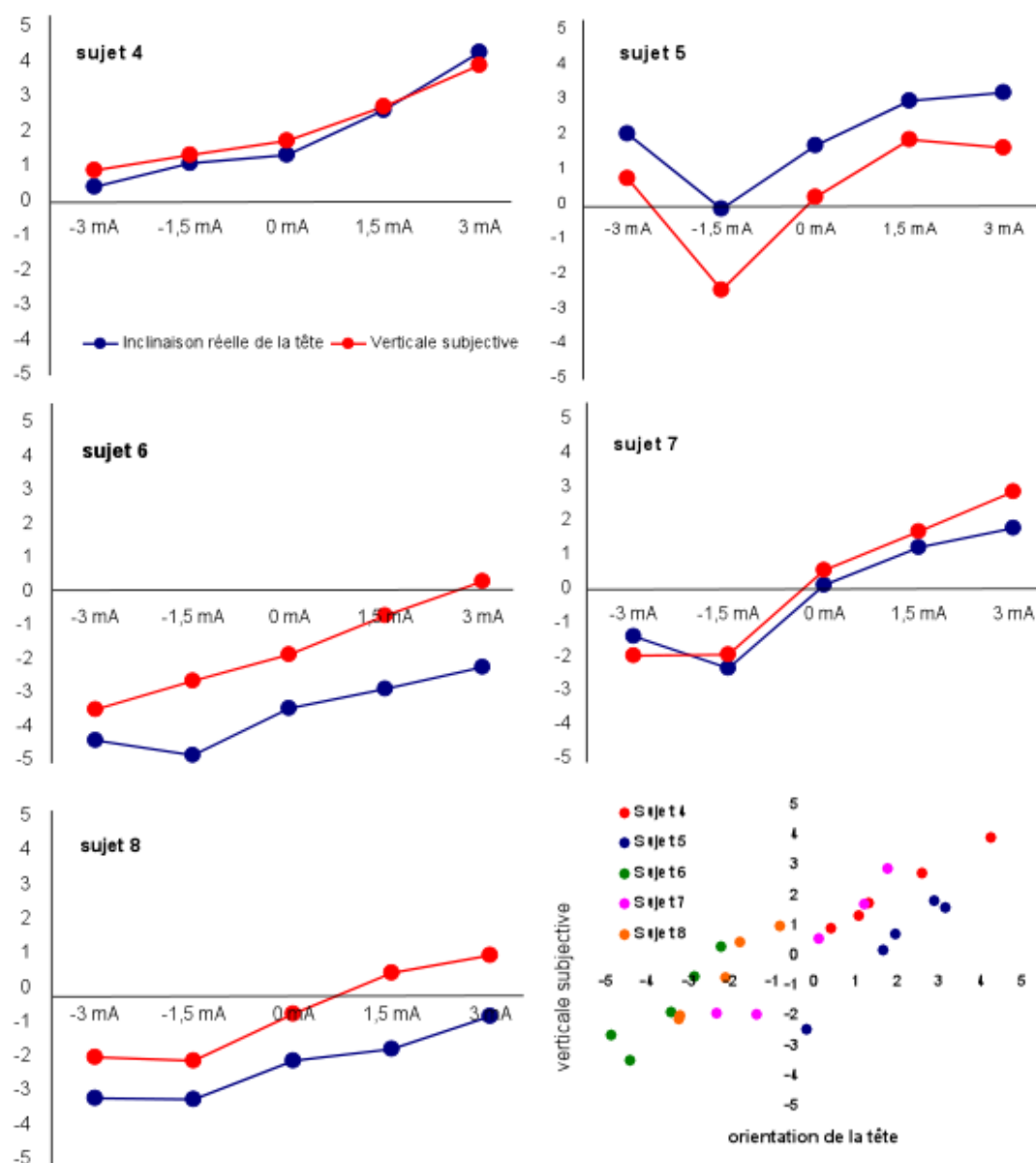


Figure 44 : Effets comparés de la SGV sur la verticale subjective et sur l'inclinaison effective de la tête observées dans la condition «tête libre».

3.3. Discussion

Les résultats montrent que la SGV produit à la fois une erreur d'estimation de la direction de la verticale dans la direction de l'anode et des illusions posturales d'orientation dans la direction opposée. L'amplitude des illusions est, en moyenne, largement plus élevée que l'effet sur la verticale subjective, environ quatre fois plus, lorsque la tête est contrainte à rester dans l'alignement du tronc.

3.3.1. *Illusions d'inclinaison corporelle induites par la stimulation galvanique vestibulaire*

L'illusion d'inclinaison du corps se décompose en deux parties : une illusion d'inclinaison du tronc par rapport à la verticale, à laquelle s'ajoute une illusion d'inclinaison de la tête par rapport au tronc, toutes deux dans la direction de la cathode. Ces effets ressemblent fort à l'image en miroir des inclinaisons posturales rapportées par Day et al (1997) et Popov et al. (1999). Les auteurs mesurent l'inclinaison du pelvis, du torse et de la tête pendant les SGV. La réponse posturale est dirigée vers l'anode et consiste en une inclinaison des trois segments les uns par rapport aux autres. Le corps semble donc se plier en arc par rapport à la verticale gravitaire. Lorsque le corps est en situation de forte instabilité (sujets debout en Romberg sensibilisé), l'inclinaison du tronc par rapport au pelvis est plus prononcée que l'inclinaison de la tête par rapport au tronc. Dans les autres conditions décrites, y compris chez le sujet assis (Day et al., 1997), les amplitudes des deux inclinaisons posturales sont presque identiques. Les illusions d'orientation rapportées ici suivent cette même règle. Leur amplitude est nettement supérieure aux inclinaisons effectives rapportées dans la littérature, mais il est difficile d'en tirer des conclusions, d'une part parce que les intensités de stimulation utilisées dans les études sur la posture sont en générale moins fortes, et d'autre part parce qu'une inclinaison du corps entier provoque une translation de la tête dans l'espace, absente chez le sujet assis.

Les illusions d'orientation corporelle apparaissent que la tête du sujet soit maintenue activement dans l'alignement du tronc ou qu'elle soit laissée libre de s'incliner sous l'effet de la stimulation. Ce résultat contredit celui de Fitzpatrick et al. (1994) qui rapportent une disparition des illusions dès lors que la réponse posturale est permise, chez des sujets debout. L'illusion vestibulaire aurait été supprimée par les informations proprioceptives générées par l'action du système postural. Une explication de la discordance entre nos résultats et ceux de Fitzpatrick et al. (1994) repose peut-être dans le fait que, malgré les consignes de ne pas résister au mouvement de la tête, les sujets aient lutté, dans une certaine mesure, contre la réponse posturale, afin de maintenir la tête droite pour estimer la verticale. Cette hypothèse s'appuie sur l'observation que trois des quatre sujets ayant montré les plus fortes inclinaisons de la tête (sujets 1, 2, et 3) ne perçoivent plus leur tronc comme incliné et perçoivent leur tête comme inclinée dans la bonne direction (quoi que l'inclinaison soit toujours largement

surévaluée). Tous les autres sujets ont perçu leur tête inclinée vers la cathode, alors qu'elle s'inclinait en réalité vers l'anode. Cette inversion dans la direction des estimations chez certains sujets explique d'ailleurs l'augmentation de la variabilité interindividuelle observée lorsque la tête est libérée (Fig. 42).

3.3.2. Dissociation entre verticale subjective et perception de l'orientation du corps

Nos résultats montrent que les illusions d'inclinaison du corps sont d'une amplitude largement supérieure à l'erreur d'estimation de la verticale. Les effets sur la verticale subjective ne peuvent donc pas être interprétés comme la conséquence directe d'une orientation corporelle mal perçue. Nos résultats viennent donc appuyer l'idée d'une différence entre les processus sous-jacents aux deux percepts, idée qui, nous l'avons vu, est maintenant largement répandue. Cette dissociation s'exprime très différemment selon les sujets. Certains commettent une erreur en estimant la verticale sans toutefois ressentir d'illusion d'orientation corporelle. D'autres se sentent inclinés, parfois de manière conséquente (sujet 2), sans montrer d'effet significatif sur la verticale subjective. Enfin, lorsque les deux types d'illusions sont mis en évidence, leur amplitude ne sont jamais en rapport. Cette variabilité dans la nature de la dissociation entre verticale subjective et perception de l'orientation du corps est également observée par Van Beuzekom et Van Gisbergen (2000), qui donnent en exemple les résultats de trois de leurs sujets dont le corps est incliné en roulis. Deux d'entre eux ont des effets prononcés sur la verticale subjective et des effets modérés sur l'estimation de l'orientation corporelle, le troisième montre un profil inverse.

L'originalité de la mise en évidence de cette dissociation dans notre étude réside dans le fait qu'elle est provoquée par la manipulation des afférences vestibulaires, en l'absence de changement dans les informations proprioceptives et somatosensorielles. On peut en conclure que l'information vestibulaire intervient différemment dans l'établissement des deux percepts. Cette conclusion peut sembler de prime abord en désaccord avec le modèle de Van Beuzekom et Van Gisbergen (2000 ; voir Fig. 22), qui fait l'hypothèse que les informations vestibulaires contribuent à déterminer l'orientation de la tête dans l'espace et que cette même information est utilisée par les deux systèmes perceptifs. Selon ce modèle, c'est la différence entre le type d'information somatosensorielle utilisée par le système nerveux central qui donne lieu à la distinction entre verticale subjective et inclinaison corporelle subjective. Nos résultats s'accordent

tout de même avec le modèle de Van Beuzekom et Van Gisbergen (2000), si l'on considère que les effets perceptifs de la SGV prennent leur source au niveau des interactions somatovestibulaires. Une même SGV produirait donc des effets distincts sur la verticale subjective et l'inclinaison corporelle subjective parce qu'elle interagirait avec des informations différentes ou avec des processus d'intégration différents. Pendant très longtemps, l'appareil vestibulaire a été mis au centre des études sur l'orientation spatiale. Plus récemment, le rôle prépondérant des informations somatosensorielles a été mis en lumière. Les enjeux actuels se situent très certainement dans les interactions entre les deux.

3.3.3. Interprétation de la réponse posturale de la tête

Un débat existe à l'heure actuelle sur l'interprétation à donner à la réaction posturale d'inclinaison du corps en réponse à la SGV. Pour certains auteurs, l'inclinaison du corps vers l'anode se ferait en compensation à une illusion d'inclinaison dans la direction opposée (Day et al., 1997 ; Tardy-Gervet et Séverac-Cauquil, 1998). Une autre formulation de cette hypothèse consiste à dire que l'information générée par la SGV est interprétée par le système nerveux central comme une inclinaison de la surface d'appui. Cette interprétation s'accorde avec la conception plus générale selon laquelle le maintien de l'équilibre postural s'effectue par le contrôle du centre de masse du corps. Une hypothèse alternative quant à l'effet de la SGV sur l'inclinaison du corps est que la réponse vise à réaligner le tronc sur la direction du vecteur gravito-inertiel, dont l'orientation est déviée vers l'anode (Inglis et al., 1995 ; Horak et Hlavacka, 2001). Cette interprétation est à rapprocher du modèle de Thomas Mergner (Fig. 19) pour lequel l'information vestibulaire serait utilisée pour contrôler l'orientation du tronc dans l'espace (Mergner et Rosemeier, 1998). En bref, la question reste de savoir si l'inclinaison posturale est la compensation d'une illusion d'inclinaison du corps ou un alignement du corps avec la direction perçue de la gravité.

L'observation du comportement de la tête des sujets dans l'expérience 4 tend à accréditer la seconde hypothèse. En effet, à une exception près, les sujets ayant montré un effet sur l'estimation de la verticale ont eu un comportement d'orientation de la tête quasi-parallèle à cet effet. L'exception est fournie par le sujet 9 dont la tête s'est bien inclinée dans la même direction que la verticale subjective, mais avec une amplitude moindre. Il faut noter que ce sujet a présenté un effet très important sur la verticale subjective et a déclaré avoir utilisé une stratégie de réponse qui consistait apparemment

à utiliser la perception qu'il avait de l'orientation de son corps pour estimer la direction de la verticale subjective. Nous avons envisagé, avant la réalisation de l'expérience, une contamination possible de l'estimation de la verticale par l'évaluation que le sujet devait faire de son orientation corporelle. En effet, le sujet devait mémoriser la perception qu'il avait de l'orientation de son tronc et de sa tête, afin de pouvoir les restituer plusieurs secondes après la fin de la stimulation. Cette tâche aurait pu influencer l'effet sur la verticale subjective. La forte similitude entre l'amplitude des effets obtenus dans les expériences 3 (condition «visuelle») et 4 (condition «tête fixe») tendent à laisser penser que ça n'a pas été le cas, sauf peut-être pour le sujet 9.

4. Conclusions de la partie expérimentale II

La seconde partie expérimentale de ce travail de thèse concernait l'étude des illusions d'orientation engendrées par la SGV. L'expérience 3 démontre pour la première fois que l'influence de la SGV sur la verticale subjective peut être mise en évidence sans que la vision ne soit mise en jeu. Dans ce cas, la perception erronée de la verticale est interprétée comme la conséquence de l'inclinaison du référentiel gravitaire à la suite d'une stimulation vestibulaire asymétrique. Les effets de la SGV semblent donc toucher les processus centraux d'intégration multisensorielle responsables de la construction des référentiels spatiaux les plus complexes. Lorsque la verticale subjective est appréhendée à l'aide de la vision, des effets spécifiques à la modalité apparaissent, probablement liés aux interactions visuo-vestibulaires de bas niveau. L'expérience 4, quant à elle, décrit et quantifie pour la première fois les illusions d'inclinaison corporelle induites par la SGV. Elle montre une dissociation nette entre ces illusions et l'inclinaison de la verticale subjective et tend à soutenir l'hypothèse selon laquelle les réponses posturales habituellement rencontrées lors de SGV visent à maintenir le corps en alignement avec la direction perçue de la gravité. Ces deux études ne forment que les premiers pas d'une démarche qui tend à mieux comprendre les déterminants des effets subjectifs de la SGV. De nombreux travaux complémentaires sont à envisager avant d'aboutir à la mise au point de systèmes utilisant cette technique pour contrôler les perceptions d'un pilote. A cet égard, nos travaux mettent en lumière plusieurs questions incontournables.

Tout d'abord, les données obtenues dans nos expériences montrent que l'altération de la perception de l'orientation spatiale par la SGV varie considérablement selon les sujets. Craig Campbell, le concepteur de Motionware, le «joystick vestibulaire» décrit en introduction, prévient déjà dans la presse avant la commercialisation de son produit que les utilisateurs devront passer outre une impression d'incrédulité pour interpréter les sensations de mouvement causées par la SGV. Il précise : «certaines personnes sont stupéfiées par le dispositif, d'autres ne comprennent pas.» Cette remarque s'accorde parfaitement avec la variabilité interindividuelle observée dans les deux expériences. Le rôle des processus cognitifs d'évaluation dans la genèse de cette variabilité ne doit pas être nié, mais les différences interindividuelles s'observent également sur des processus de plus bas niveau, échappant probablement en grande partie aux processus cognitifs. C'est par exemple le cas de la

torsion oculaire qui peut être jusqu'à 20 fois plus élevée d'un sujet à un autre (Kleine et al., 1999). La variabilité interindividuelle associée à la SGV est également retrouvée dans les flux sanguins du système nerveux central, observés grâce aux techniques d'imagerie fonctionnelle (Lobel et al., 1998). Une des explications avancées par ces auteurs est que la fixation rigide de la tête lors de la stimulation provoque un conflit entre les informations proprioceptives signalant la stabilité de la tête et les informations vestibulaires signalant un mouvement. Ce conflit potentialiserait la manifestation des différences interindividuelles dans la pondération des signaux sensoriels. Nos résultats montrent que ce n'est pas la fixation de la tête *per se* qui augmente la variabilité, au contraire. Quoi qu'il en soit, l'existence de grandes différences entre les individus, non seulement dans l'intensité des effets observés mais aussi parfois dans leur direction, peut sembler préjudiciable à l'idée de vouloir appliquer ce genre de technique de la même manière à tous les individus. Il faut noter cependant que, selon Zink et al. (1998), la variabilité des effets de la SGV sur la verticale subjective augmente avec l'intensité de stimulation jusqu'à 2,5 mA puis diminue ensuite. Les données rapportées par Zink et collaborateurs sur la verticale visuelle sont d'ailleurs très similaires aux nôtres. Nous nous sommes donc placés fortuitement dans les conditions de stimulation engendrant le plus de variabilité. De plus, il est possible de considérablement réduire la variabilité de l'amplitude des effets en déterminant les seuils de sensibilité à la stimulation pour chaque sujet et d'adapter par la suite l'intensité en conséquence (Bent et al., 2000). Cette procédure est à favoriser pour les expériences futures. Enfin, tout modèle visant à contrôler les perceptions du sujet par la SGV devra sans doute prendre en compte les caractéristiques des réponses propres à l'individu, comme c'est le cas dans les travaux de Scinicariello et al. (2001) dans le domaine du contrôle postural.

Une autre complication peut déjà être envisagée, celle liée au délai entre l'application de la SGV et la réponse induite. En effet, qu'on s'intéresse aux effets posturaux ou aux illusions perceptives, la réponse maximale s'établit dans un délai supérieur à une seconde. Scinicariello et al. (2001), pour compenser les effets d'une perturbation mécanique sur le contrôle de l'équilibre, délivrent la SGV de façon anticipée. Ceci est bien-sûr permis, car les caractéristiques de la réponse à la perturbation mécanique sont connues *a priori*. Deux solutions à ce problème peuvent être étudiées. Premièrement, il est envisageable d'inclure, dans le modèle de contrôle, une composante prédictive de la dynamique des mouvements. Dans le domaine de l'aéronautique, de tels modèles existent et permettent par exemple de recréer dans les

simulateurs de vol les caractéristiques de réponse spécifiques à chaque type d'appareil. Deuxièmement, il serait très utile de rechercher des moyens de diminuer le délai séparant l'application de la SGV et ses effets, peut-être en la combinant avec d'autres stimulations, visuelles ou somesthésiques. A ce propos, les interactions entre un flux visuel et une SGV restent inconnues à ce jour, ce qui pourrait constituer une perspective de travaux intéressante. La dissociation que nous avons observée, entre verticale subjective et inclinaison corporelle subjective, montre déjà que de fortes sensations d'inclinaison du corps peuvent être créées sans pour autant modifier de façon conséquente l'estimation de l'orientation d'un objet visuel dans l'espace.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

L'origine du travail de thèse que nous venons de présenter réside dans l'attention croissante que les concepteurs en aéronautique, et en particulier Dassault Aviation, portent au problème de la désorientation spatiale. L'enjeu est de taille, puisque ces phénomènes continuent de provoquer des pertes lourdes, en terme d'aéronefs, mais surtout en terme de vies humaines. La conception d'un aéronef dépend d'un grand nombre de facteurs techniques, mais ce sont les facteurs humains qui sont au centre de la problématique relative à la désorientation spatiale. Il paraît donc nécessaire de mettre en relation étroite les connaissances scientifiques issues des Neurosciences et de la Psychologie expérimentale avec les préoccupations de l'Ergonomie appliquée à la conception des postes de pilotage. Cette philosophie définit parfaitement la nature de cette Thèse de Doctorat, qui se veut à l'articulation des deux disciplines. Les recherches expérimentales étaient dirigées en priorité par le souci d'apporter des idées nouvelles pour la mise au point de l'instrumentation de bord, tout en tentant de répondre à plusieurs questions fondamentales relatives à l'intégration des informations spatiales par le système nerveux central.

Les premières étapes de ce travail de thèse ont fort logiquement consisté à répertorier les différentes formes d'occurrence de la désorientation spatiale, à en comprendre les mécanismes nerveux et à définir de nouvelles problématiques dans le domaine. Il est rapidement apparu que les causes de la désorientation spatiale d'origine périphériques, c'est-à-dire celles liées aux propriétés des appareils sensoriels, sont en grande partie bien connues. Les illusions visuelles et vestibulaires sont abondamment décrites et expliquées. Pourtant, malgré les efforts effectués par les concepteurs pour présenter aux pilotes des informations fiables sur l'orientation de leurs avions, les accidents sont toujours aussi nombreux. L'explication de ce paradoxe tient dans le fait que la désorientation spatiale ne se résume pas aux effets d'origine périphérique. C'est pourquoi des recherches de plus en plus nombreuses s'évertuent à préciser le rôle joué par les processus centraux dans la genèse des illusions d'orientation. La compréhension des mécanismes permettant d'interpréter des signaux ambigus ou conflictuels ou encore les facteurs cognitifs gouvernant les décisions conscientes d'orientation restent à

élucider en grande partie. C'est sans doute l'étude de ces processus de haut niveau qui apportera le plus de réponses à la désorientation spatiale dans les années futures, que ce soit au niveau de la prévention ou de la récupération, lorsque la prévention ne suffit pas. Les travaux expérimentaux que nous avons réalisés s'intéressent précisément aux processus centraux responsables de l'intégration multisensorielle, au travers de deux problématiques en lien avec la conception des postes de pilotage.

La première problématique touche au développement des afficheurs de casque et montre que présenter des informations visuelles solidaires de la tête peut, dans certaines conditions, aboutir à une perception erronée de la direction de la verticale. Une première expérience montre qu'un cadre visuel solidaire de la tête provoque des erreurs d'estimation de la verticale dans la direction de la tête, lorsque celle-ci est inclinée. Les erreurs observées lorsque la tête et le cadre visuel sont inclinés simultanément sont plus importantes que la somme de erreurs associées à l'inclinaison du cadre, d'une part, et de la tête, d'autre part. De plus, la vision continue du cadre lors des changements d'orientation de la tête ne contribue pas à diminuer la désorientation spatiale. Dans une seconde expérience, effectuée avec le corps des sujets incliné en entier, nous avons également montré qu'un cadre solidaire de la tête pouvait influencer le repositionnement volontaire de la tête, avec, là aussi, des conséquences sur la perception de la verticalité. Ces travaux défendent l'idée que la tête est au centre d'un référentiel primordial pour les jugements d'orientation et qu'inclure des références visuelles fixes dans ce référentiel peut s'avérer désorientant. Cependant, ces conclusions ne doivent pas être interprétées comme un manifeste contre l'utilisation des afficheurs de casques, puisqu'il s'agit là, sans aucun doute, d'un outil au très grand potentiel. La question de savoir si des indicateurs d'attitudes doivent y être intégrés reste ouverte, mais, si tel était le cas, il conviendrait de s'assurer par des tests préalables que leur lecture soit correcte en toute circonstance.

La seconde partie de nos travaux expérimentaux a consisté à étudier les effets de la SGV sur la perception de l'orientation spatiale. L'avancée récente des connaissances sur la SGV, essentiellement étudiée pour ses effets sur la posture, laisse penser qu'elle peut être utilisée afin de modifier, de façon contrôlée, la perception de l'orientation dans l'espace. A ce titre, deux applications sont envisageables en aéronautique : limiter les risques d'occurrence de la désorientation spatiale pour un pilote embarqué ou fournir des sensations de mouvement à un pilote déporté. Deux expériences ont été réalisées dans le but de mieux comprendre la nature des effets perceptifs de la SGV, dont la

caractéristique remarquable est de moduler spécifiquement la fréquence de décharge des nerfs vestibulaires, sans modification concomitante des informations somatosensorielles. La première expérience montre que la stimulation peut influencer l'estimation de la verticale lorsqu'elle est effectuée dans la modalité visuelle, mais également dans la modalité somatosensorielle. Ce résultat suggère, selon nous, que la SGV peut altérer les processus de haut niveau impliqués dans la perception de la verticalité. La seconde expérience décrit, pour la première fois, les illusions d'inclinaison du corps produites par la SGV. Elle met également en évidence que ces illusions sont à dissocier de l'effet observé sur la verticale subjective. Au regard des modèles actuels de l'orientation spatiale, nous proposons que cette dissociation prend place au niveau des interactions entre les informations vestibulaires et les informations somatosensorielles. Une grande variabilité interindividuelle caractérise les illusions perceptives, ce qui témoigne d'une pondération différente, selon les sujets, entre les informations vestibulaires et les informations somatosensorielles. Les deux expériences que nous avons réalisées ne sont que les premiers pas vers une compréhension satisfaisante des effets de la SGV sur la perception de l'orientation spatiale. De nombreux travaux devront être conduits avant de pouvoir envisager sérieusement l'inclusion de ce type de stimulation dans les postes de pilotage pour lutter contre la désorientation spatiale. Les perspectives ne manquent pas. Un des enjeux principaux sera de déterminer comment la modulation spécifique de l'information vestibulaire interagit avec l'information visuelle, notamment l'information cinétique. Il est également envisageable d'étudier les effets perceptifs de SGV monopolaires, unilatérales et bilatérales (cf. 1.2 de la partie expérimentale II), afin de pouvoir influencer la perception de l'orientation dans toutes les directions de l'espace. En fait, il sera nécessaire d'établir une véritable psychophysique de la SGV, afin de déterminer plus précisément les paramètres de stimulation à utiliser en fonction des effets recherchés. Enfin, il faudra prendre en compte les caractéristiques du mouvement des aéronefs pour délivrer des stimulations adaptées, dans les conditions susceptibles d'induire une désorientation spatiale.

Pour conclure, il me semble que le travail doctoral dont nous avons rendu compte est représentatif du bénéfice que l'Ingénierie et l'Ergonomie peuvent tirer des Neurosciences fondamentales. L'avenir dira si les questions abordées et les réponses apportées auront effectivement des répercussions sur la conception des postes de pilotage. Quoi qu'il en soit, il est fort probable que la désorientation spatiale restera une

priorité pour les concepteurs en aéronautique, d'autant que l'évolution des performances des avions militaires laisse présager une augmentation des contraintes sensorielles imposées aux pilotes. Etant donné les risques encourus, on peut sans aucun doute prédire que la lutte contre la désorientation spatiale ne pourra pas se faire efficacement en prenant en compte les facteurs humains à la fin du processus de définition des caractéristiques de l'avion. Au contraire, l'Homme et son système perceptif devront être placé dans la boucle de conception dès le début de l'ouvrage.

Références

1. al-Benayan, A., Zeitouni, A. G., & Katsarkas, A. (1999). Assessment of the caloric-induced tilt in the perceived visual vertical: preliminary report. J Otolaryngol, 28, 273-277.
2. Allison, R. S., Howard, I. P., & Zacher, J. E. (1999). Effect of field size, head motion, and rotational velocity on roll vection and illusory self-tilt in a tumbling room. Perception, 28, 299-306.
3. Amblard, B., Assaiante, C., Vaugoyeau, M., Baroni, G., Ferrigno, G., & Pedotti, A. (2001). Voluntary head stabilisation in space during oscillatory trunk movements in the frontal plane performed before, during and after a prolonged period of weightlessness. Exp Brain Res, 137, 170-179.
4. Amblard, B., Cremieux, J., Marchand, A. R., & Carblanc, A. (1985). Lateral orientation and stabilization of human stance: static versus dynamic visual cues. Exp Brain Res, 61, 21-37.
5. Anastasopoulos, D., Haslwanter, T., Bronstein, A. M., Fetter, M., & Dichgans, J. (1997). Dissociation between the perception of body verticality and the visual vertical in acute peripheral vestibular disorder in humans. Neurosci Lett, 233, 151-153.
6. Andersen, R. A., Essick, G. K., & Siegel, R. M. (1985). Encoding of spatial location by posterior parietal neurons. Science, 230, 456-458.
7. Andersen, R. A., & Mountcastle, V. B. (1983). The influence of the angle of gaze upon the excitability of the light-sensitive neurons of the posterior parietal cortex. J Neurosci, 3, 532-548.
8. Andersen, R. A., Snyder, L. H., Bradley, D. C., & Xing, J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. Annu Rev Neurosci, 20, 303-330.
9. Antonucci, G., Fanzon, D., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (1995). Visual factors affecting the rod-and-frame illusion: role of gap size and frame components. Perception, 24, 1119-1130.
10. Babinski, J. (1903). Sur le mécanisme du vertige voltaïque. C R Soc Biol (Paris), 55, 350-353.
11. Babler, T. G., & Ebenholtz, S. M. (1989). Effects of peripheral circular contours on dynamic spatial orientation. Percept Psychophys, 45, 307-314.
12. Bense, S., Stephan, T., Yousry, T. A., Brandt, T., & Dieterich, M. (2001). Multisensory cortical signal increases and decreases during vestibular galvanic stimulation (fMRI). J Neurophysiol, 85, 886-899.
13. Benson, A. J. (1973). Spatial disorientation in flight. A handbook for aircrew. AGARDograph, 170, 36pp.

14. Bent, L. R., McFadyen, B. J., Merkley, V. F., Kennedy, P. M., & Inglis, J. T. (2000). Magnitude effects of galvanic vestibular stimulation on the trajectory of human gait. Neurosci Lett, *279*, 157-160.
15. Berthoz, A. (1997). Le sens du mouvement. Paris: Editions Odile Jacob.
16. Betts, G. A., & Curthoys, I. S. (1998). Visually perceived vertical and visually perceived horizontal are not orthogonal. Vision Res, *38*, 1989-1999.
17. Bisdorff, A. R., Wolsley, C. J., Anastasopoulos, D., Bronstein, A. M., & Gresty, M. A. (1996). The perception of body verticality (subjective postural vertical) in peripheral and central vestibular disorders. Brain, *119*, 1523-1534.
18. Bohnker, B., Fraser, J., Baggett, J., & Hayes, G. (1991). Inflight anxiety conditions presenting with "break-off" symptoms. Aviat Space Environ Med, *62*, 342-345.
19. Braithwaite, M. G., Beal, K. G., Alvarez, E. A., Jones, H. D., & Estrada, A. (1998a). The optokinetic cervico reflex during simulated helicopter flight. Aviat Space Environ Med, *69*, 1166-1173.
20. Braithwaite, M. G., Douglass, P. K., Durnford, S. J., & Lucas, G. (1998b). The hazard of spatial disorientation during helicopter flight using night vision devices. Aviat Space Environ Med, *69*, 1038-1044.
21. Braithwaite, M. G., Durnford, S. J., Crowley, J. S., Rosado, N. R., & Albano, J. P. (1998c). Spatial disorientation in U.S. Army rotary-wing operations. Aviat Space Environ Med, *69*, 1031-1037.
22. Braithwaite, M. G., Durnford, S. J., Groh, S. L., Jones, H. D., Higdon, A. A., Estrada, A., & Alvarez, E. A. (1998d). Flight simulator evaluation of a novel flight instrument display to minimize the risks of spatial disorientation. Aviat Space Environ Med, *69*, 733-742.
23. Bremmer, F., Schlack, A., Duhamel, J. R., Graf, W., & Fink, G. R. (2001). Space coding in primate posterior parietal cortex. Neuroimage, *14*, 46-51.
24. Brenet, F., Marendaz, C., & Ohlmann, T. (1988). Interaction vision/posture lors de la localisation d'une cible enchâssée. Bull Psychol, *388*, 22-30.
25. Bringoux, L., Marin, L., Nougier, V., Barraud, P. A., & Raphel, C. (2000). Effects of gymnastics expertise on the perception of body orientation in the pitch dimension. J Vestib Res, *10*, 1-8.
26. Bringoux, L., Schmerber, S., Nougier, V., Dumas, G., Barraud, P. A., & Raphel, C. (2002). Perception of slow pitch and roll body tilts in bilateral labyrinthine-defective subjects. Neuropsychologia, *40*, 367-372.
27. Bronstein, A. M. (1999). The interaction of otolith and proprioceptive information in the perception of verticality. The effects of labyrinthine and CNS disease. Ann N Y Acad Sci, *871*, 324-333.
28. Brotchie, P. R., Andersen, R. A., Snyder, L. H., & Goodman, S. J. (1995). Head position signals used by parietal neurons to encode locations of visual stimuli. Nature, *375*, 232-235.
29. Carrozzo, M., & Lacquaniti, F. (1994). A hybrid frame of reference for visuo-manual coordination. Neuroreport, *5*, 453-456.

30. Carrozzo, M., McIntyre, J., Zago, M., & Lacquaniti, F. (1999). Viewer-centered and body-centered frames of reference in direct visuomotor transformations. Exp Brain Res, 129, 201-210.
31. Cass, S. P., Redfern, M. S., Furman, J. M., & DiPasquale, J. J. (1996). Galvanic-induced postural movements as a test of vestibular function in humans. Laryngoscope, 106, 423-430.
32. Cheung, B. S., Money, K. E., Wright, H., & Bateman, W. (1995). Spatial disorientation-implicated accidents in Canadian forces, 1982-92. Aviat Space Environ Med, 66, 579-585.
33. Cian, C., Esquivie, D., Barraud, P. A., & Raphel, C. (1995). Respective contribution of orientation contrast and illusion of self-tilt to the rod-and-frame effect. Perception, 24, 623-630.
34. Cohen, D., Otakeno, S., Previc, F. H., & Ercoline, W. R. (2001). Effect of "inside-out" and "outside-in" attitude displays on off-axis tracking in pilots and nonpilots. Aviat Space Environ Med, 72, 170-176.
35. Cohen, M. M. (1977). Disorienting effects of aircraft catapult launchings: III. Cockpit displays and piloting performance. Aviat Space Environ Med, 48, 797-804.
36. Colin, J., & Lienhart, H. (1999). Orientation spatiale et équilibration. J. Colin Médecine aérospatiale (pp. 211-224). Paris: Expansion Scientifique Publications.
37. Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001). Defining the cortical visual systems: "what", "where", and "how". Acta Psychol (Amst), 107, 43-68.
38. Curthoys, I. S. (1996). The role of ocular torsion in visual measures of vestibular function. Brain Res Bull, 40, 399-405.
39. Darling, W. G., & Hondzinski, J. M. (1997). Visual perceptions of vertical and intrinsic longitudinal axes. Exp Brain Res, 116, 485-492.
40. Day, B. L. (1999). Galvanic vestibular stimulation: new uses for an old tool. J Physiol (Lond), 517, 631.
41. Day, B. L., Severac Cauquil, A., Bartolomei, L., Pastor, M. A., & Lyon, I. N. (1997). Human body-segment tilts induced by galvanic stimulation: a vestibularly driven balance protection mechanism. J Physiol (Lond), 500, 661-672.
42. de Graaf, B., Bekkering, H., Erasmus, C., & Bles, W. (1992). Influence of visual, vestibular, cervical, and somatosensory tilt information on ocular rotation and perception of the horizontal. J Vestib Res, 2, 15-30.
43. Dichgans, J., Diener, H. C., & Brandt, T. (1974). Optokinetic-graviceptive interaction in different head positions. Acta Otolaryngol, 78, 391-398.
44. Dichgans, J., Held, R., Young, L. R., & Brandt, T. (1972). Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity. Science, 178, 1217-1219.
45. Dickey, B., & Rogers, A. (1999). Making small planes safer. Newsweek, August 16th, 26.

46. DiLorenzo, J. R., & Rock, I. (1982). The rod-and-frame effect as a function of the righting of the frame. J Exp Psychol Hum Percept Perform, 8, 536-546.
47. Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1998). Ventral intraparietal area of the macaque: congruent visual and somatic response properties. J Neurophysiol, 79, 126-136.
48. Ebenholtz, S. M., & Utrie, J. W. Jr. (1983). Peripheral circular contours inhibit the visual orientation control system. Aviat Space Environ Med, 54, 343-346.
49. Fitzpatrick, R. C., Burke, D., & Gandevia, S. C. (1994). Task-dependent reflex responses and movement illusions evoked by galvanic vestibular stimulation in standing humans. J Physiol (Lond), 478, 363-372.
50. Fitzpatrick, R. C., Wardman, D. L., & Taylor, J. L. (1999). Effects of galvanic vestibular stimulation during human walking. J Physiol (Lond), 517, 931-939.
51. Flor, H., Muhn timer, W., Karl, A., Denke, C., Grusser, S., Kurth, R., & Taub, E. (2000). A neural substrate for nonpainful phantom limb phenomena. Neuroreport, 11, 1407-1411.
52. Friedman, A., & Hall, L. D. (1996). The importance of being upright: use of environmental and viewer-centered reference frames in shape discriminations of novel three-dimensional objects. Mem Cognition, 24, 285-295.
53. Gallagher, S., & Cole, J. (1995). Body image and body schema in a deafferented subject. J of Mind and Behav, 16, 369-390.
54. Gentaz, E., & Hatwell, Y. (1996). Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation. Percept Psychophys, 58, 1278-1292.
55. Gentaz, E., Luyat, M., Cian, C., Hatwell, Y., Barraud, P. A., & Raphel, C. (2001). The reproduction of vertical and oblique orientations in the visual, haptic, and somato-vestibular systems. Q J Exp Psychol, 54, 513-526.
56. Goldberg, J. M., Smith, C. E., & Fernandez, C. (1984). Relation between discharge regularity and responses to externally applied galvanic currents in vestibular nerve afferents of the squirrel monkey. J Neurophysiol, 51, 1236-1256.
57. Goodale, M. A. (1998). Visuomotor control: where does vision end and action begin? Curr Biol, 8, 489-491.
58. Goodenough, D. R., Cox, P. W., Sigman, E., & Strawderman, W. E. (1985). A cognitive-style conception of the field-dependence dimension. Cah Psychol Cognitive, 5, 687-705.
59. Goodenough, D. R., Sigman, E., Oltman, P. K., Rosso, J., & Mertz, H. (1979). Eye torsion in response to a tilted visual stimulus. Vision Res, 19, 1177-1179.
60. Grasso, R., Ivanenko, Y., & Lacquaniti, F. (1999). Time course of gaze influences on postural responses to neck proprioceptive and galvanic vestibular stimulation in humans. Neurosci Lett, 273, 121-124.
61. Graziano, M. S., Cooke, D. F., & Taylor, C. S. (2000). Coding the Location of the Arm by Sight. Science, 290, 1782-1786.
62. Gresty, M. A., & Bronstein, A. M. (1992). Visually controlled spatial stabilisation of the human head: compensation for the eye's limited ability to roll. Neurosci Lett, 140, 63-66.

63. Grusser, O.-J. (1983). Multimodal structure of the extrapersonal space. A. Hein, & M. Jeannerod Spatially oriented behavior (pp. 327-352). New York: Springer-Verlag.
64. Guedry, F. E., & Rupert, A. H. (1991). Steady state and transient G-excess effects. Aviat Space Environ Med, 62, 252-253.
65. Guerraz, M., Poquin, D., Luyat, M., & Ohlmann, T. (1998a). Head orientation involvement in assessment of the subjective vertical during whole body tilt. Percept Mot Skills, 87, 643-648.
66. Guerraz, M., Poquin, D., & Ohlmann, T. (1998b). The role of head-centric spatial reference with a static and kinetic visual disturbance. Percept Psychophys, 60, 287-295.
67. Guerraz, M., Yardley, L., Bertholon, P., Pollak, L., Rudge, P., Gresty, M. A., & Bronstein, A. M. (2001). Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control. Brain, 124, 1646-1656.
68. Guitton, D., Kearney, R. E., Wereley, N., & Peterson, B. W. (1986). Visual, vestibular and voluntary contributions to human head stabilization. Exp Brain Res, 64, 59-69.
69. Gurfinkel, V. S., Lestienne, F., Levik, Y. u. S., Popov, K. E., & Lefort, L. (1993). Egocentric references and human spatial orientation in microgravity. II. Body-centred coordinates in the task of drawing ellipses with prescribed orientation. Exp Brain Res, 95, 343-348.
70. Gurfinkel, V. S., & Levik, Y. u. S. (1991). Perceptual and automatic aspects of the postural body scheme. J. Paillard Brain and space (pp. 147-162).
71. Gurfinkel, V. S., & Levik, Y. u. S. (1993). The suppression of cervico-ocular response by the haptokinetic information about the contact with a rigid, immobile object. Exp Brain Res, 95, 359-364.
72. Haustein, W., & Mittelstaedt, H. (1990). Evaluation of retinal orientation and gaze direction in the perception of the vertical. Vision Res, 30, 255-262.
73. Head, H., & Holmes, G. (1911-1912). Sensory disturbances from cerebral lesions. Brain, 34, 102-204.
74. Held, R. (1968). Dissociation of visual functions by deprivation and rearrangement. Psychol Forsch, 31, 338-348.
75. Heuer, H., & Sangals, J. (1998). Task-dependent mixtures of coordinate systems in visuomotor transformations. Exp Brain Res, 119, 224-236.
76. Horak, F. B., & Hlavacka, F. (2001). Somatosensory loss increases vestibulospinal sensitivity. J Neurophysiol, 86, 575-585.
77. Howard, I. P. (1997). Interactions within and between the spatial senses. J Vestib Res, 7, 311-345.
78. Howard, I. P. (1986). The perception of posture, self motion, and the visual vertical. K. R. Boff, L. K. Kaufman, & J. P. Thomas Handbook of perception and human performance (Vol. 1pp. 18-1 18-62). New York: Wiley.
79. Howard, I. P., & Childerson, L. (1994). The contribution of motion, the visual frame, and visual polarity to sensations of body tilt. Perception, 23, 753-762.

80. Howard, I. P., & Hu, G. (2001). Visually induced reorientation illusions. Perception, 30, 583-600.
81. Huteau, M. (1987). Style cognitif et personnalité - La dépendance-indépendance à l'égard du champ. Lille: Presses Universitaires de Lille.
82. Inglis, J. T., Shupert, C. L., Hlavacka, F., & Horak, F. B. (1995). Effect of galvanic vestibular stimulation on human postural responses during support surface translations. J Neurophysiol, 73, 896-901.
83. Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J., & Amblard, B. (1997). Selection of spatial frame of reference and postural control variability. Exp Brain Res, 114, 584-589.
84. Ito, Y., & Gresty, M. A. (1996). Shift of subjective reference and visual orientation during slow pitch tilt for the seated human subject. Brain Res Bull, 40, 417-421.
85. Ito, Y., & Gresty, M. A. (1997). Subjective postural orientation and visual vertical during slow pitch tilt for the seated human subject. Aviat Space Environ Med, 68, 3-12.
86. Ivanenko, Y. P., Grasso, R., & Lacquaniti, F. (1999). Effect of gaze on postural responses to neck proprioceptive and vestibular stimulation in humans. J Physiol (Lond), 519, 301-314.
87. Jeannerod, M. (1988). The neural and behavioural organization of goal-directed movements. Oxford: Oxford University Press.
88. Jeannerod, M., & Biguer, B. (1989). Référence égocentrique et espace représenté. Rev Neurol (Paris), 145, 635-639.
89. Jeka, J., Oie, K. S., & Kiemel, T. (2000). Multisensory information for human postural control: integrating touch and vision. Exp Brain Res, 134, 107-125.
90. Jeka, J. J., & Lackner, J. R. (1994). Fingertip contact influences human postural control. Exp Brain Res, 100, 495-502.
91. Karnath, H. O., Christ, K., & Hartje, W. (1993). Decrease of contralateral neglect by neck muscle vibration and spatial orientation of trunk midline. Brain, 116, 383-396.
92. Kayan, A., Trinder, E., & Harrison, M. S. (1974). The use of galvanic vestibular nystagmus in clinical otology. J Laryngol Otol, 88, 503-513.
93. Kleine, J. F., Guldin, W. O., & Clarke, A. H. (1999). Variable otolith contribution to the galvanically induced vestibulo-ocular reflex. Neuroreport, 10, 1143-1148.
94. Lacour, M., & Borel, L. (1993). Noyaux vestibulaires et contrôle postural. A. Berthoz, & P. P. Vidal Noyaux vestibulaires et vertiges (pp. 117-151).
95. Lichtenstein, J. H., & Saucer, R. T. (1974). Visual dependency in the erect and supine position. J Appl Psychol, 59, 529-531.
96. Lobel, E., Kleine, J. F., Bihan, D. L., Leroy-Willig, A., & Berthoz, A. (1998). Functional MRI of galvanic vestibular stimulation. J Neurophysiol, 80, 2699-2709.
97. Long, G. M. (1975). Rod-and-frame test performance among naval aviation personnel. Percept Mot Skills, 41, 950.

98. Loomis, J. M., Blascovich, J. J., & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. Behav Res Methods Instrum Comput, *31*, 557-564.
99. Luyat, M., Gentaz, E., Regia Corte, T., & Guerraz, M. (2001). Reference frames and haptic perception of orientation: Body and head tilt effects on the oblique effect. Percept Psychophys, *63*, 541-554.
100. Luyat, M., & Ohlmann, T. (1997). Effet d'un contexte visuel incliné : Vers une explication en termes d'inclinaison du plan médian apparent. L'Année Psychologique, *97*, 267-292.
101. Lyons, T. J., Ercoline, W. R., Freeman, J. E., & Gillingham, K. K. (1994). Classification problems of U.S. Air Force spatial disorientation accidents, 1989-91. Aviat Space Environ Med, *65*, 147-152.
102. Lyons, T. J., Gillingham, K. K., Thomae, C., & Albery, W. (1990). Low-level turning and looking mishaps. Flying Safety, *october*, 2-5.
103. Lyons, T. J., & Simpson, C. G. (1989). The giant hand phenomenon. Aviat Space Environ Med, *60*, 64-66.
104. Malcolm, R. (1984). Pilot disorientation and the use of a peripheral vision display. Aviat Space Environ Med, *55*, 231-238.
105. Marlowe, B. (1985). Spatial disorientation. Instrument cross-check ... Your achilles hell. Flying Safety, *November*, 13-16.
106. Mars, F., Honore, J., Richard, C., & Coquery, J. M. (1998). Effects of an illusory orientation of the head on straight-ahead pointing movements. Cah Psychol Cognitive / Curr Psychol Cognition, *17*, 749-762.
107. Massion, J. (1994). Postural control system. Curr Opin Neurobiol, *4*, 877-887.
108. Mast, F., & Jarchow, T. (1996). Perceived body position and the visual horizontal. Brain Res Bull, *40*, 393-398.
109. Mazzoni, P., Bracewell, R. M., Barash, S., & Andersen, R. A. (1996). Spatially tuned auditory responses in area LIP of macaques performing delayed memory saccades to acoustic targets. J Neurophysiol, *75*, 1233-1241.
110. McCarthy, G. W., & Stott, J. R. (1994). In flight verification of the inversion illusion. Aviat Space Environ Med, *65*, 341-344.
111. McIntyre, J., Berthoz, A., & Lacquaniti, F. (1998). Reference frames and internal models for visuo-manual coordination: what can we learn from microgravity experiments? Brain Research Reviews, *28*, 143-154.
112. McIntyre, J., Stratta, F., & Lacquaniti, F. (1997). Viewer-centered frame of reference for pointing to memorized targets in three-dimensional space. J Neurophysiol, *78*, 1601-1618.
113. Merfeld, D. M., Zupan, L., & Peterka, R. J. (1999). Humans use internal models to estimate gravity and linear acceleration. Nature, *398*, 615-618.
114. Mergner, T., Huber, W., & Becker, W. (1997). Vestibular-neck interaction and transformation of sensory coordinates. J Vestib Res, *7*, 347-367.

115. Mergner, T., Nasios, G., & Anastasopoulos, D. (1998). Vestibular memory-contingent saccades involve somatosensory input from the body support. Neuroreport, *9*, 1469-1473.
116. Mergner, T., & Rosemeier, T. (1998). Interaction of vestibular, somatosensory and visual signals for postural control and motion perception under terrestrial and microgravity conditions - a conceptual model. Brain Res Rev, *28*, 118-135.
117. Mergner, T., Siebold, C., Schweigart, G., & Becker, W. (1991). Human perception of horizontal trunk and head rotation in space during vestibular and neck stimulation. Exp Brain Res, *85*, 389-404.
118. Merryman, R. F., & Cacioppo, A. J. (1997). The optokinetic cervical reflex in pilots of high-performance aircraft. Aviat Space Environ Med, *68*, 479-487.
119. Mertz, S., & Lepecq, J. C. (2001). Imagined body orientation and perception of the visual vertical. Psychol Res, *65*, 64-70.
120. Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). The visual brain in action. Oxford: Oxford University Press.
121. Mittelstaedt, H. (1995a). The formation of the visual and the postural vertical. T. Mergner, & F. Hlavacka Multisensory Control of Posture (pp. 147-155).
122. Mittelstaedt, H. (1995b). New diagnostic tests for the function of utricles, saccules and somatic graviceptors. Acta Otolaryngol Suppl (Stockh), *520*, 188-193.
123. Mittelstaedt, H. (1983). A new solution to the problem of the subjective vertical. Naturwissenschaften, *70*, 272-281.
124. Mittelstaedt, H. (1998). Origin and processing of postural information. Neurosci Biobehav Rev, *22*, 473-478.
125. Mittelstaedt, H. (1986). The subjective vertical as a function of visual and extraretinal cues. Acta Psychol (Amst), *63*, 63-85.
126. Montgomery, K. S. S., & Montgomery, R. A. G. (1989). Visual dominance training: A method of spatial orientation training? (A call for research). Proceedings of the 26th Annual Symposium SAFE Association, 186-191.
127. Nakayama, K., & Balliet, R. (1977). Listing's law, eye position sense, and perception of the vertical. Vision Res, *17*, 453-457.
128. Nordwall, B. D. (1989). Pilot sense attitude with peripheral vision using new Garrett display. Aviat Week Space Technol, (May), 97-99.
129. Ohlmann, T. (1990a). Evocabilité différentielle des référentiels spatiaux, posture et orientation spatiale. V. Nougier, & J. P. Blanchi Pratiques sportives et modélisation du geste (pp. 215-240). Grenoble: Collection Grenoble Sciences.
130. Ohlmann, T. (1990b). Les systèmes perceptifs spatiaux vicariants. M. Reuchlin, J. Lautrey, C. Marendaz, & T. Ohlmann Cognition : L'individuel et l'universel (pp. 21-58). Paris: PUF.
131. Ohlmann, T., & Marendaz, C. (1991). Vicariances et affordances, deux outils pour l'ergonomie cognitive. Science et défense *91* (pp. 372-389). Paris: Dunod.
132. Oltman, P. K. (1968). A portable rod-and-frame apparatus. Percept Mot Skills, *26*, 503-506.

133. Paillard, J. (1991). Knowing where and knowing how to get there. J. Paillard Brain and space (pp. 461-481).
134. Pancratz, D. J., Bomar, J. B. Jr, & Raddin, J. H. Jr. (1994). A new source for vestibular illusions in high agility aircraft. Aviat Space Environ Med, 65, 1130-1133.
135. Papaxanthis, C., Pozzo, T., Popov, K. E., & McIntyre, J. (1998). Hand trajectories of vertical arm movements in one-G and zero-G environments. Evidence for a central representation of gravitational force. Exp Brain Res, 120, 496-502.
136. Parker, D. E., Poston, R. L., & Gullledge, W. L. (1983). Spatial orientation: visual-vestibular-somatic interaction. Percept Psychophys, 33, 139-146.
137. Pastor, M. A., Day, B. L., & Marsden, C. D. (1993). Vestibular induced postural responses in Parkinson's disease. Brain, 116, 1177-1190.
138. Patterson, F. R., Cacioppo, A. J., Gallimore, J. J., Hinman, G. E., & Nalepka, J. P. (1997). Aviation spatial orientation in relationship to head position and attitude interpretation. Aviat Space Environ Med, 68, 463-471.
139. Pettorossi, V. E., Bambagioni, D., Bronstein, A. M., & Gresty, M. A. (1998). Assessment of the perception of verticality and horizontality with self- paced saccades. Exp Brain Res, 121, 46-50.
140. Popov, K. E., Kozhina, G. V., Smetanin, B. N., & Shlikov, V. Y. (1999). Postural responses to combined vestibular and hip proprioceptive stimulation in man. Eur J Neurosci, 11, 3307-3311.
141. Previc, F. H. (2000). Neuropsychological guidelines for aircraft control stations. IEEE Eng Med Biol Mag, 19, 81-88.
142. Previc, F. H. (1998). The neuropsychology of 3-D space. Psychol Bull, 124, 123-164.
143. Quarck, G., Etard, O., Normand, H., Pottier, M., & Denise, P. (1998). Low intensity galvanic vestibulo-ocular reflex in normal subjects. Neurophysiol Clin, 28, 413-422.
144. Reuchlin, M. (1978). Processus vicariants et différences interindividuelles. J Psychol, 2, 133-145.
145. Richard, C., Honore, J., & Rousseaux, M. (2000). Is there a distortion of body projection in extracorporeal space in neglect patients? Neuroreport, 11, 3047-51.
146. Rizzolatti, G., & Camarda, R. (1987). Neural circuits for spatial attention and unilateral neglect. M. Jeannerod Neurophysiological and neuropsychological aspects of spatial neglect (pp. 289-313). Amsterdam: North-Holland.
147. Rock, I. (1990). The frame of reference. I. Rock The legacy of Solomon Asch (pp. 243-268). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
148. Sares, F., Bourdin, C., & Gauthier, G. M. (en préparation). Influence of peripheral visual information on head sensory-motor responses during gravito-inertial changes.
149. Schneider, E., Glasauer, S., & Dieterich, M. (2000). Central processing of human ocular torsion analyzed by galvanic vestibular stimulation. Neuroreport, 11, 1559-1563.

150. Schneider, G. E. (1969). Two visual systems. Science, 163, 895-902.
151. Scinicariello, A. P., Eaton, K., Inglis, J. T., & Collins, J. J. (2001). Enhancing human balance control with galvanic vestibular stimulation. Biol Cybern, 84, 475-480.
152. Sekitani, T. (1988). Differential diagnosis of vertigo--combined galvanic test and MRI. Acta Otolaryngol Suppl, 458, 113-119.
153. Severac-Cauquil, A., & Day, B. L. (1998). Galvanic vestibular stimulation modulates voluntary movement of the human upper body. J Physiol (Lond), 513, 611-619.
154. Severac Cauquil, A., Gervet, M. F., & Ouaknine, M. (1998). Body response to binaural monopolar galvanic vestibular stimulation in humans. Neurosci Lett, 245, 37-40.
155. Severac Cauquil, A., Martinez, P., Ouaknine, M., & Tardy-Gervet, M. F. (2000). Orientation of the body response to galvanic stimulation as a function of the inter-vestibular imbalance. Exp Brain Res, 133, 501-505.
156. Sherrington, C. S. (1893). Note on the knee-jerk and the correlation of action of antagonistic muscles. Proc Roy Soc Lond, 52, 556-564.
157. Sigman, E., Goodenough, D. R., & Flannagan, M. (1979). Instructions, illusory self-tilt and the rod-and-frame test. Q J Exp Psychol, 31, 155-165.
158. Sigman, E., Goodenough, D. R., & Flannagan, M. (1978). Subjective estimates of body tilt and the rod-and-frame test. Percept Mot Skills, 47, 1051-1056.
159. Slater, K. R. (1993). Spatial disorientation and the giant hand phenomenon. Flying Safety, June, 14-16.
160. Smith, D. R., Cacioppo, A. J., & Hinman, G. E. (1997). Aviation spatial orientation in relationship to head position, altitude interpretation, and control. Aviat Space Environ Med, 68, 472-478.
161. Snyder, L. H., Batista, A. P., & Andersen, R. A. (1997). Coding of intention in the posterior parietal cortex. Nature, 386, 167-170.
162. Snyder, L. H., Grieve, K. L., Brotchie, P., & Andersen, R. A. (1998). Separate body- and world-referenced representations of visual space in parietal cortex. Nature, 394, 887-891.
163. Soechting, J. F., & Flanders, M. (1992). Moving in three-dimensional space: frames of reference, vectors, and coordinate systems. Annu Rev Neurosci, 15, 167-191.
164. Soechting, J. F., Tillery, S. I. H., & Flanders, M. (1990). Transformation from head- to shoulder-centered representation of target direction in arm movements. J Cogn Neurosci, 2, 32-43.
165. Spidalieri, G., & Sgolastra, R. (1999). The head midline as a reliable reference frame for encoding head-on-body orientation. Neuroreport, 10, 2473-2476.

166. Spinelli, D., Antonucci, G., Daini, R., Martelli, M. L., & Zoccolotti, P. (1999). Hierarchical organisation in perception of orientation. Perception, 28, 965-979.
167. Stein, J. F. (1992). The representation of egocentric space in the posterior parietal cortex. Behav Brain Sc, 15, 691-700.
168. Streibel, M. J., Barnes, R. D., Julness, G. D., & Ebenholtz, S. M. (1980). Determinants of the rod-and -frame effect: Role of organization and subjective contour. Percept Psychophys, 27, 136-140.
169. Stricanne, B., Andersen, R. A., & Mazzoni, P. (1996). Eye-centered, head-centered, and intermediate coding of remembered sound locations in area LIP. J Neurophysiol, 76, 2071-2076.
170. Tardy-Gervet, M. F., & Severac-Cauquil, A. (1998). Effect of galvanic vestibular stimulation on perception of subjective vertical in standing humans. Percept Mot Skills, 86, 1155-1161.
171. Taylor, J. B., & Kuchar, J. K. (2000). Helmet-mounted display symbology for terrain avoidance during low-level maneuvers. Intern J Aviat Psychol, 10, 155-168.
172. Teasdale, N., Nougier, V., Barraud, P. A., Bourdin, C., Debu, B., Poquin, D., & Raphel, C. (1999). Contribution of ankle, knee, and hip joints to the perception threshold for support surface rotation. Percept Psychophys, 61, 615-624.
173. Thier, P., & Andersen, R. A. (1996). Electrical microstimulation suggests two different forms of representation of head-centered space in the intraparietal sulcus of rhesus monkeys. Proc Natl Acad Sci U S A, 93, 4962-4967.
174. Tokumaru, O., Kaida, K., Ashida, H., Mizumoto, C., & Tatsuno, J. (1998). Visual influence on the magnitude of somatogravic illusion evoked on advanced spatial disorientation demonstrator. Aviat Space Environ Med, 69, 111-116.
175. Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. Cognit Psychol, 12, 97-136.
176. Trevarthen, C. B. (1968). Two mechanisms of vision in primates. Psychol Forsch, 31, 299-348.
177. Ungerleiden, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield Analysis of visual behavior (pp. 549-586). Cambridge: The MIT Press.
178. Vaishnavi, S., Calhoun, J., & Chatterjee, A. (2001). Binding personal and peripersonal space: evidence from tactile extinction. J Cogn Neurosci, 13, 181-189.
179. Van Beuzekom, A. D., & Van Gisbergen, J. A. (1999). Comparison of tilt estimates based on line settings, saccadic pointing, and verbal reports. Ann N Y Acad Sci, 871, 451-454.
180. Van Beuzekom, A. D., & Van Gisbergen, J. A. (2000). Properties of the internal representation of gravity inferred from spatial-direction and body-tilt estimates. J Neurophysiol, 84, 11-27.
181. Wade, N. J. (1968). Visual orientation during and after lateral head, body, and trunk tilt. Percept & Psychophys, 3, 215-219.

182. Wade, S. W., & Curthoys, I. S. (1997). The effect of ocular torsional position on perception of the roll-tilt of visual stimuli. Vision Res, 37, 1071-1078.
183. Watson, D. (1992). Visual dominance can lead to illusions and disorientation. CAA Aviation Bulletin, 2.
184. Watson, S. R., Brizuela, A. E., Curthoys, I. S., Colebatch, J. G., MacDougall, H. G., & Halmagyi, G. M. (1998). Maintained ocular torsion produced by bilateral and unilateral galvanic (DC) vestibular stimulation in humans. Exp Brain Res, 122, 453-458.
185. Weinstein, L. F., Gillingham, K. K., & Ercoline, W. R. (1994). United States Air Force head-up display control and performance symbology evaluations. Aviat Space Environ Med, 65 Suppl, A20-30.
186. Weinstein, L. F., Previc, F. H., Simpson, C. G., Lyons, T. J., & Gillingham, K. K. (1991). A test of thumb and index finger control in overcoming a visual analogue of the giant hand illusion. Aviat Space Environ Med, 62, 336-341.
187. Weiss, P. H., Marshall, J. C., Wunderlich, G., Tellmann, L., Halligan, P. W., Freund, H. J., Zilles, K., & Fink, G. R. (2000). Neural consequences of acting in near versus far space: a physiological basis for clinical dissociations. Brain, 123, 2531-2541.
188. Witkin, H. A., & Asch, S. E. (1948). Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. J Exp Psychol, 38, 762-782.
189. Wood, S. J., Paloski, W. H., & Reschke, M. F. (1998). Spatial coding of eye movements relative to perceived earth and head orientations during static roll tilt. Exp Brain Res, 121, 51-58.
190. Yardley, L. (1990). Contribution of somatosensory information to perception of the visual vertical with body tilt and rotating visual field. Percept Psychophys, 48, 131-134.
191. Young, L. R., Shelhamer, M., & Modestino, S. (1986). M.I.T./Canadian vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 2. Visual vestibular tilt interaction in weightlessness. Exp Brain Res, 64, 299-307.
192. Zink, R., Bucher, S. F., Weiss, A., Brandt, T., & Dieterich, M. (1998). Effects of galvanic vestibular stimulation on otolithic and semicircular canal eye movements and perceived vertical. Electroen Clin Neuro, 107, 200-205.
193. Zink, R., Steddin, S., Weiss, A., Brandt, T., & Dieterich, M. (1997). Galvanic vestibular stimulation in humans: effects on otolith function in roll. Neurosci Lett, 232, 171-174.
194. Zipser, D., & Andersen, R. A. (1988). A back-propagation programmed network that simulates response properties of a subset of posterior parietal neurons. Nature, 331, 679-684.
195. Zoccolotti, P., Antonucci, G., Goodenough, D. R., Pizzamiglio, L., & Spinelli, D. (1992). The role of frame size on vertical and horizontal observers in the rod-and-frame illusion. Acta Psychol (Amst), 79, 171-187.

RESUMES

La désorientation spatiale en aéronautique : apport des Neurosciences intégratives à la conception des postes de pilotage

Les épisodes de désorientation spatiale forment une source importante d'accidents en aéronautique. Pour lutter contre ces phénomènes, il est nécessaire de comprendre les propriétés des systèmes sensoriels impliqués dans la perception de l'orientation spatiale, afin d'adapter au mieux l'instrumentation de bord. Le cadre général du présent manuscrit fait l'état des connaissances actuelles relatives à la désorientation spatiale. Il présente également certains des mécanismes fondamentaux de l'intégration multisensorielle dans le domaine de l'orientation spatiale, en relation avec l'ergonomie sensorielle des postes de pilotages. Les travaux expérimentaux qui suivent s'intéressent tout d'abord à l'influence d'un cadre visuel dont la caractéristique est d'être solidaire de l'orientation de la tête, sur la perception de la verticale. Les résultats suggèrent principalement le rôle fondamental du référentiel céphalocentré dans le traitement des informations visuelles orientées. Les répercussions potentielles de ces résultats sur la conception des afficheurs de casque, utilisés dans les avions, sont envisagées. Une seconde partie expérimentale s'intéresse aux effets de la stimulation galvanique vestibulaire sur la perception de l'orientation spatiale, avec la perspective d'inclure ce type de stimulation dans les postes de pilotage. Il est montré que cette technique de stimulation influence la verticale subjective, quelle que soit la modalité sensorielle impliquée. De plus, les stimulations de l'appareil vestibulaire induisent des effets clairement dissociés sur la verticale subjective, d'une part, et sur la perception de l'orientation du corps, d'autre part. Ces résultats sont mis en rapport avec les modèles actuels de l'orientation spatiale.

Spatial disorientation in aeronautics: Contribution of integrative Neuroscience to the design of cockpit displays

Spatial disorientation is a major source of accidents in aviation. Fighting such phenomenon necessarily entails the understanding of sensory systems that are involved in the perception of self-orientation, in order to adapt accordingly the cockpit displays. The introductory part of the manuscript sets out what is known about the occurrences of spatial disorientation. Some of the fundamental mechanisms of space perception are also presented, in relation to sensory ergonomics applied to the design of cockpit displays. The subsequent experimental studies deal at first with the influence of a head-fixed visual frame, integral to the head, on the perception of the vertical. The results mainly put forward the crucial role of the head-centric reference frame in the processing of oriented visual information. The potential implications of those results on the design of head-mounted displays, which are used in airplanes, are underlined. A second experimental chapter deals with the effects of galvanic vestibular stimulation on the perception of spatial orientation, a stimulation technique that could be included in the cockpit in order to fight spatial disorientation. It is demonstrated that such a stimulation can influence the subjective vertical, whatever the sensory modality involved. Besides, stimulating the vestibular apparatus gives rise to clearly dissociated effects on the subjective vertical, on the one hand, and the perception of body orientation, on the other hand. The results are compared with the current models of spatial orientation.

Mots clés : perception, orientation, désorientation, aviation, intégration sensorielle, ergonomie, vision, appareil vestibulaire, verticale subjective, référentiels spatiaux